

## PENGARUH JEJARI HIDROLIK REGENERATOR DAN FREKUENSI GELOMBANG BUNYI TERHADAP KINERJA POMPA KALOR TERMOAKUSTIK GELOMBANG BERJALAN

Prastowo Murti<sup>1,\*</sup>, Ikhsan Setiawan<sup>2</sup>, Muhammad N M Fadly<sup>2</sup>, Solli Dwi Murtyas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Jalan Kapten Suparman 39 Magelang, 56116

<sup>2</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada,

Sekip Utara BLS 21 Yogyakarta, 55281

\*prastowo@untidar.ac.id

Diterima: 22 November 2017

Direvisi: 30 Januari 2018

Disetujui: 2 Februari 2018

### ABSTRAK

*Refrigerant* yang ada pada pompa kalor konvensional berdampak langsung terhadap lingkungan, salah satunya adalah merusak lapisan ozon, sehingga diperlu dibuat pompa kalor yang ramah lingkungan. Pompa kalor termoakustik adalah mesin pompa kalor yang memanfaatkan fenomena termoakustik dan tidak menggunakan refrigerant yang berbahaya pada lingkungan. Termoakustik adalah fenomena gelombang bunyi dapat menimbulkan perbedaan suhu atau sebaliknya. Pompa kalor termoakustik menghasilkan perbedaan suhu dikedua sisi *regenerator* yang mana dapat dimanfaatkan sebagai pendingin dan pemanas. Pompa kalor termoakustik terdiri dari pipa *resonator*, *loudspeaker*, dan *regenerator*. *regenerator* adalah jantung dari termoakustik tempat terjadinya konversi energi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada optimasi jejari hidrolis regenerator berbahan wire mesh (kasa kawat) stainless-steel dan frekuensi gelombang bunyi pada kinerja pompa kalor termoakustik gelombang berjalan. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa jejari hidrolis *regenerator* dan frekuensi gelombang bunyi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perbedaan suhu dikedua sisi *regenerator*. Perbedaan suhu kedua sisi *regenerator* terbesar yang diperoleh sebesar 51,5 °C, dimana sisi dingin memiliki suhu 12,2 °C yang dapat dimanfaatkan sebagai pendingin dan sisi panas pompa kalor memiliki suhu 63,6 °C yang dapat dimanfaatkan sebagai pemanas.

**Kata kunci:** pompa kalor termoakustik, gelombang berjalan, regenerator, frekuensi.

### ABSTRACT

*The refrigerant in the conventional heat pump has affected to the environmental. One of them is ozone depletion, thus, heat pump which has no impact on the environment is needed. The thermoacoustic heat pump is heat pump device which employs thermoacoustic phenomena and works with no refrigerant hence environmental benign. Thermoacoustics is phenomena sound wave that can cause a temperature difference or vice versa. The thermoacoustic heat pump produces temperature difference in the both side of the regenerator in which can be used as refrigerator and heater. Thermoacoustic heat pump consists of resonator tube, loudspeaker, and regenerator. Regenerator is the heart of thermoacoustic which is energy conversion takes place. Therefore, this research focuses on optimization of hydraulic radius of stainless steel wire mesh regenerator and frequency of the sound wave on the performance traveling-wave thermoacoustic heat pump. The experimental results show that hydraulic radius of regenerator and frequency of sound wave gives significant effect to temperature difference on the both side of regenerator. The largest temperature difference reach is 51,5 °C, which is cold side have 12,2 °C that can be used as a refrigerator and hot side have 63,6 °C that can be used as a heater.*

**Keywords:** thermoacoustic heat pump, traveling-wave, regenerator, frequency.

## PENDAHULUAN

Dewasa ini perkembangan pompa kalor (*heat pump*) memberikan kemudahan, kemajuan, dan kemuliaan umat manusia. Seiring dengan dampak positif terhadap lingkungan, dampak negatif muncul pun muncul secara bersamaan. Salah satu dampak negatif itu adalah penggunaan *refrigerant* pada lemari pendingin maupun pendingin ruangan. Kebocoran *refrigerant* pada mesin pendingin menyebabkan lapisan ozon berlubang. Sehingga penggunaan *refrigerant* yang mengandung dampak negatif diatur dalam *Montreal Protocol* tahun 1987.

Dengan alasan-alasan yang telah tersebut di atas, penulis tergerak untuk melakukan penelitian mengenai piranti termoakustik untuk mengurangi dampak negatif *refrigerant*. Piranti ini diharapkan dapat digunakan sebagai pengganti mesin pendingin konvensional yang menggunakan *refrigerant* berbahaya. Piranti termoakustik yang dimaksud ialah pompa kalor termoakustik (*thermoacoustic heat pump*) tanpa menggunakan *refrigerant* berbahaya namun hanya menggunakan medium seperti udara dan gas mulia yang ramah lingkungan. Pompa kalor termoakustik menggunakan fenomena Termoakustik yaitu fenomena fisis dimana gelombang bunyi dapat menimbulkan perbedaan suhu (Setiawan, 2005).

Berdasarkan jenis gelombang bunyi yang digunakan, pompa kalor termoakustik dapat dibedakan menjadi dua yaitu mesin termoakustik gelombang berjalan dan mesin termoakustik gelombang tegak. Perbedaan antara pompa kalor termoakustik gelombang tegak dan gelombang tegak terletak pada beda fase dilokasi regenerator antara osilasi tekanan dan osilasi kecepatan. Pada pompa kalor termoakustik gelombang tegak murni, beda fase antara tekanan dan kecepatan adalah  $90^\circ$  sedangkan pada pompa kalor termoakustik gelombang berjalan murni tekanan dan kecepatan osilasi sefase. Perbedaan lain terletak pada siklus yang dialami paket gas. Pada pompa kalor gelombang tegak siklus termodinamik yang terjadi adalah pendekatan siklus Brayton sedangkan pada pompa kalor termoakustik gelombang berjalan pendekatan siklus Stirling. Sehingga pompa kalor termoakustik gelombang berjalan memiliki

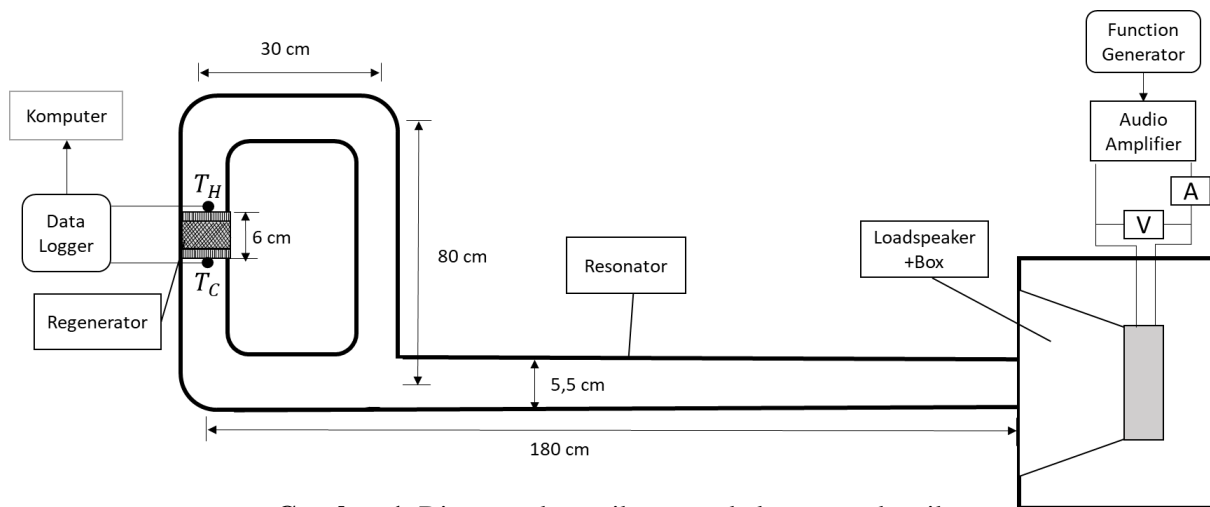
kinerja yg lebih baik dibanding pompa kalor termoakustik gelombang tegak (Swift, 1999).

Seperti pada penjelasan sebelumnya, medium pompa kalor termoakustik adalah gas, maka medium tidak berubah fase. Sehingga pompa kalor termoakustik dapat menghasilkan pendingin maupun pemanas dengan rentan suhu yang tinggi. Sebagai pendingin, pompa kalor termoakustik mampu menghasilkan suhu  $-65^\circ\text{C}$  (Tijani, 2002). Sedangkan sebagai pemanas, pompa kalor mampu menghasilkan suhu  $350^\circ\text{C}$  (Bassem, 2011). Berdasarkan hasil ini kinerja pompa kalor termoakustik bisa dibandingkan dengan pompa kalor konvensional. Disamping itu, banyak keunggulan yang dimiliki oleh teknologi ini. Adapun beberapa keunggulannya adalah memiliki reliabilitas tinggi, relatif murah, ramah lingkungan, no moving part (tidak bergerak), dan terintegrasi.

Setiawan (2014) membuat piranti pompa kalor termoakustik tipe gelombang berjalan yang mana tabung resonator terbuat dari bahan PVC (Polyvinyl Chloride) dan membentuk simpal dengan total keliling 220 cm. Hasil uji coba optimum diperoleh pendinginan sebesar  $6,2^\circ\text{C}$  dan pemanasan  $10,2^\circ\text{C}$ . Penelitian ini memperlihatkan bahwa pompa kalor termoakustik dapat dibuat dengan menggunakan bahan-bahan berbiaya murah. Pada penelitian ini, penulis berupaya meningkatkan kinerja pompa kalor termoakustik tipe gelombang berjalan berbahan PVC dengan mengubah parameter kerja seperti frekuensi gelombang bunyi dan jejari hidrolis regenerator. Parameter ini memiliki pengaruh terhadap kinerja alat, sehingga diharapkan mampu menghasilkan pendingin dan pemanas dengan rentan suhu lebih luas (beda suhu tinggi).

## METODE PENELITIAN

Gambar 1 merupakan skematik penelitian yang terdiri dari *loudspeaker* (merk CUBIG model 251, maksimum 400 watt,  $4\ \Omega$ , diameter 10 inch), pipa PVC sepanjang 370 cm (220 cm pipa bagian melingkar dan 150 cm pipa lurus) dengan diameter 5,5 cm, dan regenerator yang terbuat dari susunan keping bulat *wire mesh* (kasa kawat) *stainless steel* dengan berbagai nomor *mesh*. Kepingan *mesh* disusun hingga panjang 6 cm.



**Gambar 1.** Diagram skematik pompa kalor termoakustik

Frekuensi gelombang bunyi diatur menggunakan *Audio Function Generator* (AFG), sementara input listrik ke *loudspeaker* diatur oleh *audio amplifier* yang dimonitor dengan dua buah multimeter (Voltmeter dan Amperemeter). Suhu dikedua sisi regenerator diukur menggunakan sensor LM35 yang dikoneksikan dengan data logger dan dimonitor melalui komputer.

Lima regenerator digunakan untuk mengetahui pengaruh jejeri hidrolik regenerator terhadap kinerja pompa kalor termoakustik. Jejeri hidrolik  $r_h$  regenerator yang terbuat dari *mesh* dihitung dengan

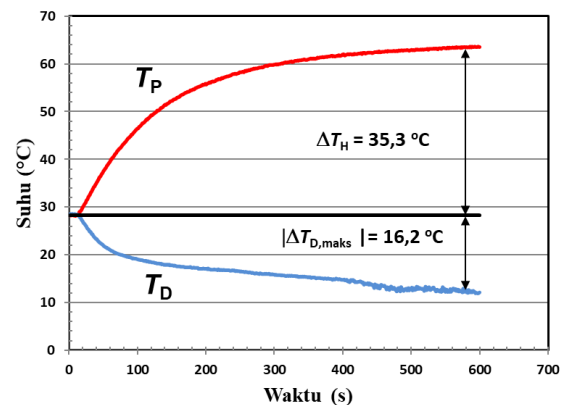
$$r_h = D \frac{\phi}{4(1-\phi)} \quad (1)$$

dimana  $D$  adalah jejeri kawat *mesh* dan  $\phi$  adalah porositas yang dinyatakan sebagai  $\phi = 1 - (\pi n D / 4)$ .  $n$  adalah nomor *mesh* (banyak kawat per unit panjang) (Swift, 2001). Hasil perhitungan jejeri hidrolik regenerator dapat dilihat di tabel 1.

**Tabel 1.** Perhitungan jejeri hidrolik regenerator

Regenerator	$n$ (1/inch)	$D$ (mm)	$r_h$ (mm)
1	30	0,18	0,22
2	40	0,16	0,16
3	50	0,14	0,13
4	60	0,14	0,10
5	80	0,12	0,07

## HASIL DAN PEMBAHASAN



**Gambar 2.** Grafik suhu terhadap waktu saat jejeri hidrolik 0,10 mm dan frekuensi 30 Hz.

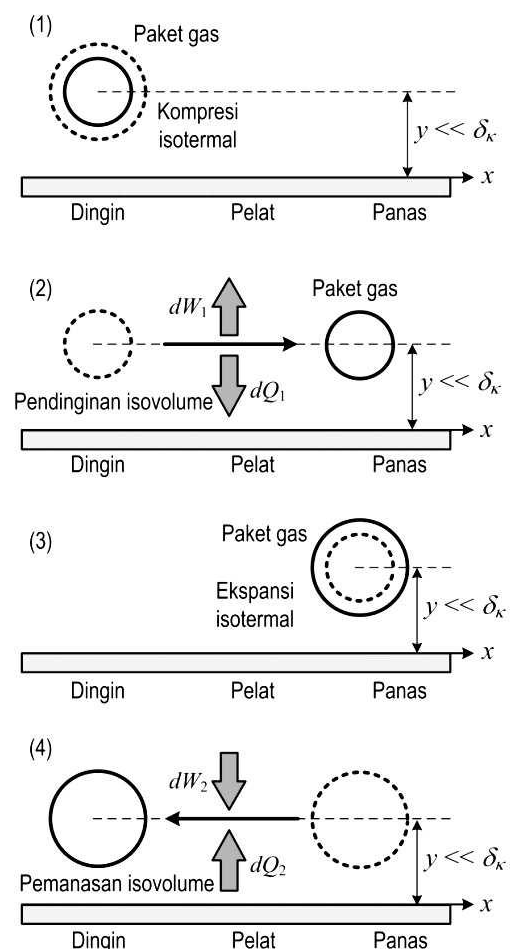
Gambar 2 merupakan grafik perubahan suhu dikedua sisi regenerator saat jejeri hidrolik 0,10 mm dan frekuensi gelombang bunyi 30 Hz. Terlihat pada mulanya suhu kedua sisi regenerator adalah sama. Kemudian saat sistem pembangkit gelombang bunyi diaktifkan, terjadi perubahan suhu dikedua sisi. Sisi panas regenerator adalah sisi yang memiliki suhu lebih tinggi dibanding suhu awal, dan begitupun sebaliknya sisi dingin regenerator adalah sisi yang memiliki suhu lebih rendah dari suhu awalnya. Dari grafik nampak suhu sisi panas regenerator ( $T_p$ ) naik hingga ( $\Delta T_p$ ) 35,3 °C dari suhu awal 28,3 °C, sedangkan suhu sisi dingin regenerator ( $T_D$ ) turun ( $\Delta T_{D, Maks}$ ) 16,2 °C dari suhu awal. Sehingga perbedaan kedua suhu kedua sisi regenerator adalah 51,5 °C.

Ketika sistem pembangkit gelombang bunyi belum diaktifkan, partikel gas (medium) didalam regenerator dalam kondisi diam. Sementara saat sumber bunyi diaktifkan, partikel gas akan berosilasi sekaligus memindahkan kalor dari sisi dingin ( $T_D$ ) ke sisi panas ( $T_P$ ). Fenomena ini disebut dengan termoakustik. Gambar 3 adalah ilustrasi fenomena termoakustik, ilustrasi ini digunakan untuk memudahkan pemahaman fisis fenomena termoakustik. Paket gas merupakan volume gas cukup kecil sehingga tekanan dan suhu seragam namun cukup besar untuk meninjau sifat-sifat makroskopik gas. Regenerator diasumsikan merupakan susunan pelat sejajar yang mana letak paket gas bergerak bolak balik dalam arah sejajar, kemudian paket gas memiliki kecepatan dan tekanan sefase akibat dari gelombang bunyi berjalan.

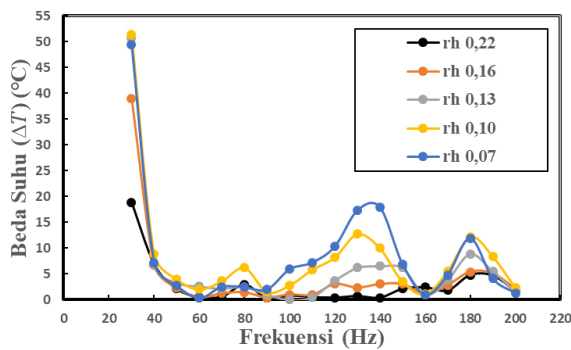
Paket gas yang berosilasi di dekat pelat datar dengan jarak  $y \ll \delta_K$  (kondisi kontak termal sempurna) maka akan mengalami empat tahapan seperti gambar 3. Pada tahap (1) paket gas mengalami kompresi isothermal di dekat pelat yang dingin. Selanjutnya, dalam tahap (2) paket gas bergerak ke daerah dekat bagian pelat yang panas dan pada saat bersamaan mengalami pendinginan pada volume konstan dengan melepaskan kalor ( $dQ_1$ ) kepada pelat sehingga pada saat itu paket gas melakukan usaha ( $dW_1$ ) pada lingkungan. Kemudian, pada tahap (3) paket gas mengalami ekspansi isothermal di dekat bagian pelat yang panas. Terakhir, pada tahap (4) paket gas bergerak kembali ke daerah dekat pelat yang dingin dan pada saat bersamaan mengalami pemanasan pada volume konstan dengan menyerap kalor ( $dQ_2$ ) dari pelat, sehingga pada saat itu usaha ( $dW_2$ ) dilakukan pada paket gas oleh lingkungannya (Setiawan, 2014). Siklus ini kembali berulang hingga terjadi perbedaan suhu diantara dua sisi regenerator.

Gambar 4 merupakan grafik pengaruh frekuensi gelombang bunyi terhadap perbedaan suhu di kedua sisi regenerator untuk beberapa jejari hidrolis. Pada percobaan frekuensi diatur dari 30 Hz sampai 200 Hz. Pemilihan frekuensi 30 Hz sebagai frekuensi

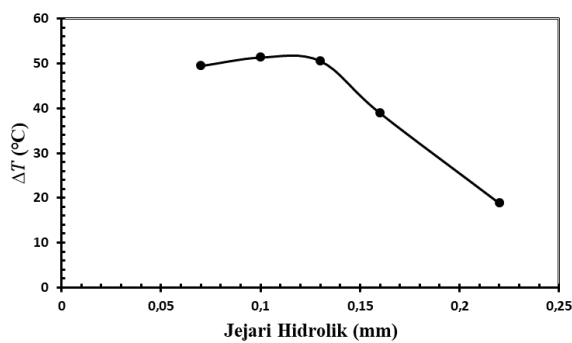
terendah dikarenakan keterbatasan dari kemampuan *loudspeaker*. Berdasarkan pengamatan, frekuensi 30 Hz untuk semua jejari hidrolis regenerator menghasilkan perbedaan suhu yang paling tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa frekuensi 30 Hz merupakan frekuensi yang dekat dengan frekuensi resonansi dari sistem pompa kalor termoakustik. Pompa kalor termoakustik akan bekerja secara maksimal apabila frekuensi gelombang bunyi merupakan frekuensi resonansi dari sistem. Karena saat frekuensi resonansi, paket gas berosilasi dengan maksimal. Ketika paket gas berosilasi maksimal, semakin banyak kalor yang dipindahkan paket gas dari sisi dingin regenerator ke sisi panas regenerator. Sehingga, terjadi perbedaan (gradien) suhu yang besar antara kedua sisi regenerator (Murti, 2015)



**Gambar 3.** Ilustrasi tahapan proses siklus pompa kalor termoakustik gelombang berjalan (Setiawan, 2014)



**Gambar 4.** Pengaruh frekuensi gelombang bunyi terhadap beda suhu di kedua sisi regenerator untuk beberapa jejari hidrolik.



**Gambar 5.** Pengaruh regenerator dengan beberapa jejari hidrolik pada frekuensi gelombang bunyi 30 Hz terhadap perbedaan suhu pompa kalor termoakustik gelombang berjalan.

Selanjutnya, gambar 5 merupakan grafik perbedaan suhu tiap jejari hidrolik pada frekuensi 30 Hz. Terlihat jejari hidrolik 0,10 mm menghasilkan perbedaan suhu di kedua sisi regenerator sebesar 51,5 °C. Hasil ini merupakan perbedaan suhu yang paling besar dibanding dengan jejari hidrolik yang lainnya. Ketika pompa kalor termoakustik bekerja dengan gelombang berjalan, hal yang perlu diperhatikan adalah parameter non-dimensional  $\omega\tau$ . Untuk pompa kalor termoakustik gelombang berjalan nilai parameter  $\omega\tau$  harus bernilai kurang dari 1. Hal sebaliknya apabila pompa kalor termoakustik gelombang tegak, nilai parameter  $\omega\tau$  harus bernilai kurang lebih 1 (Yazaki, 1998).

Parameter  $\omega\tau$  merepresentasikan pertukaran kalor antara pelat dan paket gas.  $\omega\tau$  didefinisikan sebagai

$$\omega\tau = \left( \frac{r_h}{\delta_k} \right)^2 \quad (2)$$

dimana  $r_h$  adalah jejari hidrolik regenerator.

Kedalaman penetrasi termal  $\delta_k$  adalah jarak yang dapat ditempuh oleh kalor didalam medium selama selang waktu  $T = 1/f$ . Kedalaman penetrasi termal dihitung dengan  $\delta_k = \sqrt{2\alpha/\omega}$ .  $\alpha$  adalah difusivitas gas dan  $\omega$  adalah frekuensi angular gelombang bunyi.

Pompa kalor termoakustik pada penelitian ini menggunakan udara saat tekanan atmosfer dan suhu kamar sebagai gas kerja (medium). sehingga, pompa kalor termoakustik gelombang berjalan memiliki  $\omega\tau$  0,04 ketika regenerator dengan jejari hidrolik 0,10 mm dan frekuensi gelombang bunyi 30 Hz. Melihat  $\omega\tau$  ini, ada kesesuaian dengan teori pompa kalor termoakustik gelombang berjalan, sehingga mampu menghasilkan perbedaan suhu yang tinggi. Pompa kalor termoakustik yang memiliki perbedaan suhu tinggi merupakan pompa kalor dengan kinerja tinggi. Sama halnya dengan hasil penelitian ini, pompa kalor berfungsi sebagai pendingin pada suhu 12,2 °C. Sementara pompa kalor sebagai pemanas pada suhu 63,6 °C.

## KESIMPULAN

Penelitian eksperimental pengaruh jejari hidrolik regenerator dan frekuensi gelombang bunyi terhadap pendingin dan pemanas dengan rentan suhu lebih luas pompa kalor termoakustik gelombang berjalan telah dilakukan. Eksperimen ini menunjukkan bahwa jejari hidrolik regenerator dan frekuensi gelombang bunyi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perbedaan suhu di kedua sisi regenerator. Perbedaan suhu tertinggi yang diperoleh sebesar 51,5 °C. Sehingga pompa kalor termoakustik dapat digunakan sebagai pendingin dan pemanas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami tujukan kepada Universitas Tidar karena telah mendukung penelitian ini dengan hibah penelitian dosen pratama (nomor: 472.ap/UN57/LT/2017). Terima kasih kepada bapak Ikhsan Setiawan, Muhammad N. M. Fadly, dan Agung. B. S. Utomo dari Jurusan Fisika FMIPA UGM yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, *Montreal Protocol*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Protocol), diakses 20 Agustus 2017.
- Bassem, M. *Et al.* 2011. *Thermoacoustic Stirling Heat Pump Working as a Heater*. Int. J. Refrig. 34, 1125.
- Kikuchi, R. *Et al.* 2015. *Measurement of Performance of Thermoacoustic Heat Pump in -3 to 160 °C temperature range*. Jpn. J. of Apl. Phys. 54, 117101.
- Murti, P. *Et al.* 2015. Pengaruh panjang stack kasa kawat stainless-steel dan heat exchanger pada kinerja pendingin termoakustik gelombang berdiri berbiaya murah. Proceeding Seminar Nasional Teknik Mesin 10 (SNTM 10) 13 august 2015 Universitas Kristen Petra ISBN: 978-979-25-4419-0
- Setiawan, I., *et al.* 2005. Rancang Bangun Piranti Termoakustik Sebagai Pendingin dan Pemanas Secara Simultan, Laporan Penelitian Antar Bidang Ilmu, Proyek Penelitian Antar Bidang Ilmu, FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Setiawan, I. 2014. Pembuatan Piranti Pendingin Termoakustik Gelombang Berjalan, Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Terapannya (SNAFT IV), 15 November 2014, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia.
- Setiawan, I. *Et al.* 2017. *Experimental Demonstration of the Dependence of Temperature Decrease on the Hydraulic Radius of Regenerator in a Traveling-Wave Thermoacoustic Refrigerator*. J. Of phys: Conf. Ser. 820 012012.
- Swift, G. W, 1997, *Thermoacoustic Engine*, Editor M. J.Crocker, Encyclopedia of Acoustic, John Willey & Sons, New York.
- Swift, G.W. 2001. *Thermoacoustic: A Uniflying Perspective for Some Engine and Refrigerator*, Los Alamos National Laboratory, Acoustical Society of America Publication.
- Tijani. MEH, *et al.* 2002. *Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator*. Cryogenics, 42 (2002) 59–66.
- Yazaki T. *et al.* 1998, *Travelling wave thermoacoustic engine in a looped tube*, Physics Review Letters, 81(15): 3128-3131.