

Kajian Numerik Pengaruh Jari-Jari *Stack* terhadap Pemanasan Suhu Rendah Mesin Termoakustik Gelombang Berjalan

S W Utami^{1,2}, I Farikhah^{1,3}, N Khoiri^{1,4}, S. Patonah^{1,5}, U Kaltsum^{1,6}

¹Program Studi Pendidikan Fisika Universitas PGRI Semarang, Jl. Lontar No. 1 Semarang

²E-mail: Septianiwahyuutami@gmail.com, irnafarikha@upgris.ac.id

⁴nurkhoiri78@gmail.com, ⁵siti_blimbing9@yahoo.co.id, ⁶ummikaltsum@upgris.co.id

Abstrak. Termoakustik merupakan salah satu ilmu teknologi yang memanfaatkan ilmu termodinamika dan gelombang. Piranti termoakustik sendiri dibagi menjadi dua, yakni mesin termoakustik yang mengubah energi panas menjadi gelombang akustik, dan heat pump yang digunakan memompa kalor dari tandon suhu rendah ke suhu yang lebih tinggi dengan memanfaatkan gelombang akustik. Penelitian ini mengkaji secara numerik pengaruh jari-jari stack terhadap efisiensi dan nilai suhu pemanasan rendah mesin termoakustik. Penelitian ini menggunakan aplikasi fortran dengan koding untuk mendapatkan nilai stabilitas limit yang salah satu keluarannya adalah suhu pemanasan rendah. Hasil nilai suhu pemanasan terendah tercapai ketika stack memiliki jari-jari sebesar 0,12 mm yakni 124 °C.

Kata kunci: Suhu Pemanasan Rendah, Efisiensi, Mesin Termoakustik

Abstract. Thermoacoustic is one of the technological sciences that utilizes thermodynamics and waves. The thermoacoustic device is divided into two, namely the thermoacoustic engine that converts heat energy into acoustic waves, and the heat pump used to pump heat from low temperature reservoirs to higher temperatures by utilizing acoustic waves. This study examines numerically the effect of stack radius on efficiency and the value of low heating temperature of thermoacoustic engine. The result that the low heating temperature is 124 °C at radius 0.12 mm.

Keywords: Low Heating Temperature, Thermoacoustic

1. Pendahuluan

Klasifikasi sistem panas bumi menggunakan kriteria dari nilai panas yang ada, berdasarkan sistem klasifikasi panas oleh Hochstein tahun 1990 pembagian klasifikasi sistem panas bumi berentalphi rendah memiliki nilai <125°C, kemudian untuk sistem panas bumi yang berentalphi sedang memiliki nilai 125°C - 225°C, sedangkan sistem panas bumi yang memiliki entalphi tinggi memiliki suhu sekitar >225°C. Indonesia sendiri memiliki sistem panas bumi hidrothermal yang memiliki temperatur tinggi (>225°C) dan juga terdapat temperatur sedang (150°C-225°C) dimana kedua sistem ini telah dikembangkan baik di Indonesia maupun luar negeri sebagai salah satu pembangkit listrik tenaga panas bumi, karena potensi panas bumi di Indonesia sendiri sangat besar berkisar diangka 30%-40% dari seluruh panas bumi yang ada di dunia yang dapat menghasilkan daya sebesar 27500 MW [1]. Pembangkit listrik tenaga panas bumi hanya menggunakan kriteria panas pada suhu tinggi dan sedang, sehingga untuk kriteria panas pada suhu rendah (<225°C) tidak digunakan. Untuk memanfaatkan kriteria panas disuhu rendah ini perlu adanya suatu teknologi yang dapat merubah panas bumi suhu rendah ke energi yang lain, misalnya energi akustik yang kita sebut dengan termoakustik. Dimana ilmu ini merupakan gabungan dari termodinamika dan gelombang.

Termoakustik merupakan salah satu bidang ilmu yang mengkaji mengenai hubungan antara gelombang bunyi dan panas (kalor), yakni hubungan konversi energi termal (panas) menjadi akustik, atau energi akustik (gelombang bunyi) menjadi energi termal [2]. Berdasarkan jenis gelombang yang digunakan, terdapat dua jenis sistem termoakustik, yakni: (a) tipe gelombang tegak; dan (b) tipe gelombang berjalan [3]. Termoakustik sendiri memiliki komponen alat yang digunakan untuk memproduksi efek termoakustik, yang dinamakan dengan piranti termoakustik [4]. Piranti termoakustik dapat dibedakan mejadi dua, yakni : (a) pompa kalor (*thermoacoustic heat pump/ Cooler*) dimana piranti ini digunakan untuk memompa kalor dari tandon kalor suhu yang lebih rendah ke suhu yang lebih tinggi, yang dapat menghasilkan perbedaan suhu dengan menggunakan gelombang akustik dan (b) Mesin (*Engine/ Prime mover*) piranti yang mengkonversi energi panas, menjadi energi akustik (suara). Fenomena termoakustik terjadi ketika gelombang akustik menjalar dalam pipa sempit dimana gas dalam pipa tersebut mengalami interaksi dengan dinding pipa. Sebagai hasil dari interaksi panas ini, konversi antara daya panas dan daya akustik terjadi. Dengan menggunakan energi ini, kita dapat mengkonstruksi sebuah mesin termoakustik [5]. Kemudian energi akustik ini dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik atau pendingin.

Beberapa penelitian termoakustik dengan menggunakan gelombang tegak masih dilakukan, salah satunya di tahun 2013 Normah mengembangkan mesin panas termoakustik portable yang mengubah energi dari proses pembakaran biomasa menjadi daya akustik. Dengan gas kerjanya ialah udara biasa pada tekanan 1 atm. Hasil dari penelitian ini memiliki nilai efisiensi sebesar 1,7% dengan amplitudo tekanan dimesin sebesar 101 kPa, daya akustik yang dihasilkan dalam stack ialah 50,67 W, laju suplai kalor ke *stack* 2952,9 W [6]. Kemudian Setiawan pada tahun 2015 merancang bangun dan menguji mesin termoakustik tipe gelombang tegak dengan menggunakan tabung resonator lurus (*straight tube*), yang didalamnya terdapat sebuah *stack*, penukar kalor panas (HHX), penukar kalor lingkungan(AHX) , dan udara biasa dengan tekanan 1 atm dan suhu kamar 27C. Hasil dari rancang bangun serta pengujian mesin yang dibuat oleh Setiawan yang terdiri dari satu *stack*, nilai efisiensinya sebesar 1,4% . Setiawan menyebutkan bahwa beberapa upaya perlu dilakukan untuk memperbaiki nilai efisiensi dan meningkatkan kinerja prime mover tersebut [2]. Ketika ingin memperbaiki tingkat efisiensi, piranti sistem termoakustik yang berpengaruh secara umum ialah pada mesin, dan tabung resonator looped. Kedua hal tersebut diperlukan untuk menaikkan efisiensi dari sebuah sistem termoakustik [7]. Namun, belum tentu ketika didapatkan nilai suhu rendah pemanasan akan mendapatkan nilai efisiensi yang tertinggi pula. Maka dari itu parameter-parameter dari mesin termoakustik akan mempengaruhi nilai dari suhu rendah pemanasan, dan efisiensi. Termasuk jari-jari *stack*.

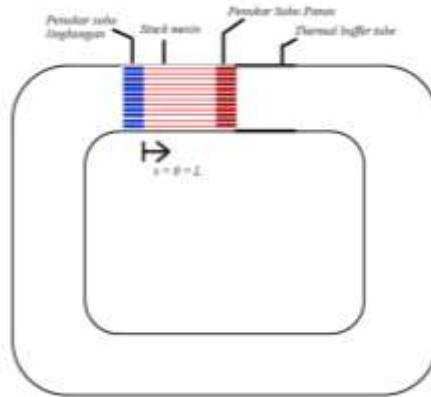
Berangkat dari berbagai permasalahan yang diuraikan diatas, maka perlu untuk mencari nilai suhu pemanasan rendah dan efisiensi yang dihasilkan ketika memvariasikan parameter jari-jari, sehingga nilai suhu pemanasan rendah dan juga nilai efisiensi maksimum diketahui.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jari-jari *stack* terhadap suhu rendah pemanasan serta nilai efisiensi mesin termoakustik dengan menggunakan perhitungan numerik.

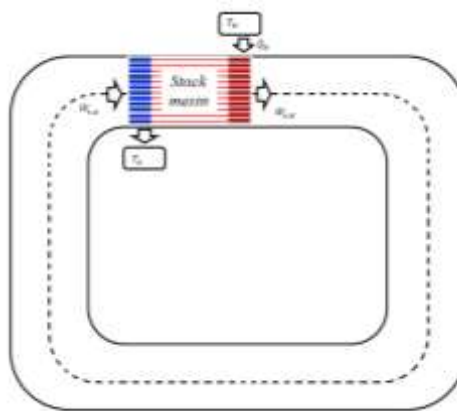
2. Metode

2.1 Model Perhitungan

Pada gambar (1) menunjukkan sebuah skema gambar dari model perhitungan. Parameter nilai dari desain, seperti pada panjang dari tabung dinotasikan dengan L_{loop} untuk nilainya ditentukan sebesar 2.8 m, dengan diameter dalam sebesar 40 mm, dan tabung *looped* ini terisi dengan gas kerja helium dengan tekanan sebesar 0.51 MPa. Terdapat satu mesin termoakustik didalamnya yang terdiri dari satu *stack* mesin, penukar suhu panas (*hot heat exchanger*) dan penukar suhu lingkungan (*ambient heat exchanger*), serta *thermal buffer tube*.



Gambar (1): Skema sistem mesin termoakustik



Gambar (2) . Skema aliran energi yang ada dalam sistem

Panjang *stack* sekitar 40 mm. *Stack* ini dimodelkan sebagai susunan saluran lingkaran. Jari-jari dari susunan saluran lingkaran yang terdapat pada *stack mesin* (engine) ini yang dijadikan variabel bebas untuk mengetahui adakah pengaruh jari-jari tersebut terhadap nilai efisiensi dan suhu rendah pemanasan.

Temperatur pada penukar suhu panas dan penukar suhu lingkungan, dinotasikan secara berturut-turut sebagai T_H dan T_A . Nilai dari suhu T_A pada perhitungan numerik ditentukan pada 301K. Kemudian untuk nilai dari T_H didapatkan dari perhitungan stabilitas limit dimana variabel bebas, digunakan satu persatu untuk menemukan daya pemanasan terendah. Setiap penukar panas (*heat exchanger*) telah dimodelkan sebagai serangkaian pelat datar yang ditumpuk, dengan ruang antara pelat sekitar 1.0 mm dan tinggi sekitar 10 mm. Terdapat sebuah ruang *thermal buffer* setelah komponen penukar panas.

2.2 Metode Perhitungan

2.2.1 Transfer Matriks

Menggunakan aproksimasi akustik Rott [7], persamaan momentum dan kontinuitas dalam sebuah pipa alir di tulis sebagai [3]

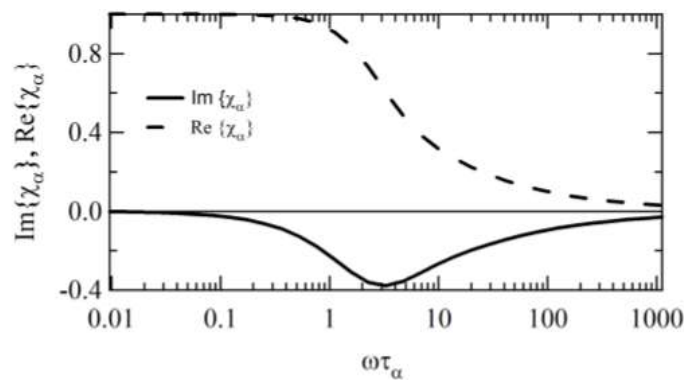
$$\frac{dP}{dx} = -\frac{1}{A} \frac{i\omega\rho_m}{1 - \chi_v} U, \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dx} = -\frac{i\omega A[1 + (\gamma - 1)\chi_\alpha]}{\rho_m} P + \frac{\chi_\alpha - \chi_\nu}{(1 - \chi_\nu)(1 - \sigma)} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} U \quad (2)$$

Di sini, ω adalah frekuensi sudut gelombang bunyi, A adalah luas penampang pipa, ρ_m adalah kerapatan rata-rata, γ adalah rasio panas spesifik, σ adalah angka Prandtl, P_m adalah tekanan rata-rata, dan T_m adalah suhu rata-rata. x mewakili koordinat dalam arah aksial. Karena ρ_m , γ , σ bergantung pada T_m , nilai properti fisik udara dirujuk ke nilai data properti fisik [9] Masing-masing P mewakili fluktuasi tekanan dan U mewakili fluktuasi kecepatan aliran.

$$\chi_\alpha = \frac{2J_1(Y_\alpha)}{Y_\alpha J_0(Y_\alpha)}, \quad \chi_\nu = \frac{2J_1(Y_\nu)}{Y_\nu J_0(Y_\nu)} \quad (3)$$

$$Y_\alpha = (i-1)\sqrt{\omega\tau_\alpha}, \quad Y_\nu = (i-1)\sqrt{\omega\tau_\nu} \quad (4)$$



Gambar 3 χ_α untuk silinder melingkar titik horisontal adalah [8]

Dimana J_1 dan J_0 adalah fungsi Bessel ke-1 dan ke-0, secara berurutan, dan τ_α dan τ_ν adalah "thermal and viscous relaxation times", secara berurutan. τ_α didefinisikan sebagai $\tau_\alpha = r^2/2\alpha$ dan τ_ν sebagai $\tau_\nu = r^2/(2\nu)$, dimana secara berurutan α and ν adalah diffusivitas thermal dan viskositas kinematis. Setiap $\omega\tau_\alpha$ dan $\omega\tau_\nu$ dapat juga didiskripsikan oleh r dan ketebalan dari batas lapisan panas, δ_α , dan dari batas lapisan viskositas, δ_ν , sebagai $\omega\tau_\alpha = (r/\delta_\alpha)^2$ dan $\omega\tau_\nu = (r/\delta_\nu)^2$. $\omega\tau_\alpha$ dan $\omega\tau_\nu$ dihubungkan oleh $\sigma = \nu/\alpha$ sebagai $\frac{\omega\tau_\alpha}{\sigma} = \omega\tau_\nu$. Gambar 3 masing-masing menunjukkan χ_α dan χ_ν dari kanal lingkaran sebagai fungsi dari $\omega\tau_\alpha$ dan $\omega\tau_\nu$. [10].

Persamaan (1) dan (2) dapat dimodifikasi kedalam bentuk matriks, sehingga menjadi berikut [11]:

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} P(x,t) \\ U(x,t) \end{pmatrix} = C(x) \begin{pmatrix} P(x,t) \\ U(x,t) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$C(x) \equiv \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{A} \frac{i\omega\rho_m}{1 - \chi_\nu} \\ -\frac{i\omega A[1 + (\gamma - 1)\chi_\alpha]}{\gamma P_m} & \frac{\chi_\alpha - \chi_\nu}{(1 - \chi_\nu)(1 - \chi_{pr})} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \end{pmatrix}$$

Matriks C merepresentasikan persamaan gelombang dari suatu bidang perambatan gelombang suara didalam kanal. Oleh karena itu, c_{22} , yang mana merupakan bentuk kedua disisi kanan pada persamaan (2) memiliki peran penting pada nilai "stability" dari osilasi gas spontan. Kemudian, transfer matriks dibedakan menjadi dua keadaan, yakni sebagai berikut [10].

a. Tidak Terdapat Perbedaan Suhu

Ketika $\frac{dT_m}{dx} = 0$, persamaan (5) dapat diselesaikan secara analitis, hal ini dikarenakan $\gamma, \chi_v, \chi_\alpha$ dan σ tidak bergantung pada x , dan bentuk kedua pada sisi kanan dari persamaan (2) hilang. Ketika tekanan dan kecepatan volume di titik x_0 dinotasikan oleh P_0 dan U_0 setiap solusi dapat ditunjukkan sebagai persamaan dibawah ini:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P(x, t) \\ U(x, t) \end{pmatrix} &= M_I(x, x_0) \begin{pmatrix} P_0(x_0, t) \\ U_0(x_0, t) \end{pmatrix}, \\ M_I(x, x_0) &= \frac{\cos[k(x - x_0)]}{Ak(1 - \chi_v) \sin[k(x - x_0)]} - \frac{i\omega\rho_m \sin[k(x - x_0)]}{Ak(1 - \chi_v)} \\ &\equiv \frac{i\omega\rho_m \sin[k(x - x_0)]}{Ak(1 - \chi_v)} \cos[k(x - x_0)] \end{aligned} \tag{6}$$

dimana k merupakan kompleks bilangan gelombang yang diberikan oleh:

$$k = \frac{\omega}{a} \sqrt{\frac{1 + (\gamma - 1)\chi_\alpha}{1 - \chi_v}} \tag{7}$$

dimana a adalah kecepatan adiabatik gelombang suara. Persamaan (6) menunjukkan secara spesifik ketika P dan U pada satu titik, distribusi P dan U sepanjang pipa tanpa gradien suhu dapat dihitung.

b. Terdapat Gradien Suhu

Ketika $\frac{dT_m}{dx} \neq 0$, akan menjadi lebih sulit untuk menyelesaikan persamaan (5). Oleh karena itu, pada kasus ini, terintegrasi secara komputasi, selanjutnya dengan menerapkan skema yang berbeda menggunakan orde-empat Runge Kutta untuk persamaan (5),

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P(x + \Delta x, t) \\ U(x + \Delta x, t) \end{pmatrix} &= (E + \Delta x C'(x)) \begin{pmatrix} P(x, t) \\ U(x, t) \end{pmatrix}, \\ C'(x) &= \frac{1}{6} (RK_A + 2RK_B + 2RK_C \\ &\quad + 2RK_D), \\ RK_A &= C(x), \\ RK_B &= C\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \left(E + \frac{\Delta x}{2} RK_A\right), \\ RK_C &= C\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \left(E + \frac{\Delta x}{2} RK_B\right), \\ RK_D &= C(x + \Delta x) (E + \Delta x RK_C) \end{aligned} \tag{8}$$

dimana E merupakan matriks satuan, oleh karena itu:

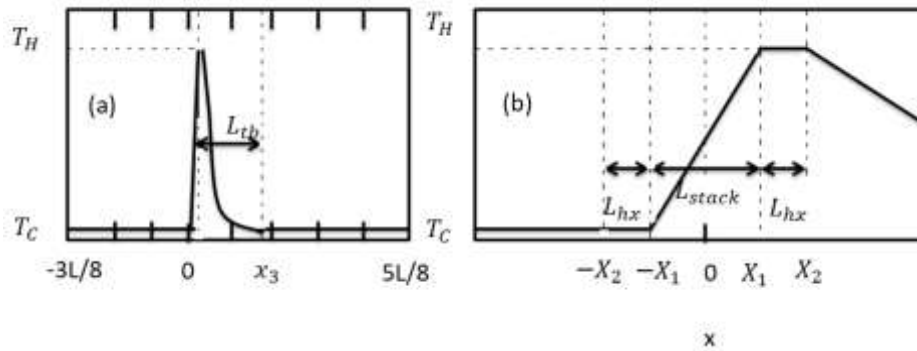
$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P(x, t) \\ U(x, t) \end{pmatrix} &= M_{II}(x, x_0) \begin{pmatrix} P_0(x_0, t) \\ U_0(x_0, t) \end{pmatrix}, \\ M_{II}(x, x_0) &\equiv (E + \Delta x C'_{n-1})(E \\ &\quad + (\Delta x C'_{n-2}) \dots (E + \Delta x C'_1) + (\Delta x C'_0) \end{aligned} \tag{9}$$

diperoleh. Dimana n merupakan angka pemisah antara x_0 dan x , Δx didefinisikan sebagai $x - x_0/n$, dan C'_j menunjukkan C' pada saat $x = x_0 + j\Delta x$. Persamaan ini menunjukkan bahwa meskipun gradien suhu dipaksakan sepanjang *thermal buffer tube/stack*. Ketika P dan U disediakan pada satu posisi, distribusi dari P dan U dapat dihitung.

2.2.2 PERHITUNGAN STABILITAS LIMIT

Tahun 2007 Ueda menguraikan cara untuk melakukan perhitungan stabilitas limit. (Gambar 2.4) Dimana sejak T_m dijaga pada nilai yang konstan dari $x = -3L/8$ hingga $-X_2$, transfer matriks $M_{1,1}$ dari daerah ini telah dihitung menggunakan M_1 , demikian pula transfer matriks untuk $x = -X_2$ ke $-X_1$ (Penukar suhu dingin), untuk $x = X_1$ ke X_2 (Penukar suhu panas),

dan untuk $x=X_3$ ke $5L/8$ masing-masing telah dihitung dan dinotasikan oleh $M_{I,chx}$, $M_{I,hhx}$, dan $M_{1,2}$ [10]



Gambar 4: Distribusi temperatur (a) Sepanjang pipa (b) Dekat dengan *stack*

Persamaan (9) telah digunakan untuk menghitung matriks transfer $M_{II,s}$ untuk $x=-X_1$ ke X_1 (*stack*) dan $M_{II,tb}$ untuk $x=X_2$ ke X_3 (*thermal buffer tube*). Angka partisi $n=100$ telah digunakan karena sudah dikonfirmasi nilainya melalui perhitungan stabilitas limit dengan $n=100,200$ dan 400 hampir sama.

Menggunakan matriks $M_{1,1}$, $M_{I,chx}$, $M_{I,hhx}$, $M_{1,2}$, $M_{II,s}$, dan $M_{II,l}$, transfer matriks dari “*looped tube*” ke “*straight tube*”, M_{all} dituliskan sebagai:

$$M_{all} = M_{1,2}M_{II,l}M_{I,hhx}M_{II,s}M_{I,chx}M_{1,1} \tag{10}$$

Perhatikan bahwa dalam penelitian ini, kita tidak memperhitungkan efek nonlinier, seperti “*minor loss*” terjadi pada titik terhubung antar komponen. Dengan menggunakan M_{all} , tekanan osilasi P_a dan volume kecepatan U_a pada saat $x=-3L/8$ terhubung dengan osilasi tekanan P_b dan volume kecepatan U_b pada $x=5L/8$ sebagai:

$$M_{all} \begin{pmatrix} P_a \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_b \\ U_b \end{pmatrix} \tag{11}$$

dengan menggunakan persamaan ini kita menghitung stabilitas limit dari induksi panas osilasi gas

Perhitungan stabilitas limit pada tabung *looped* dapat dilakukan sebagai berikut

Sejak $x=-3L/8$ dan $x=5L/8$ menunjukkan posisi yang sama pada pipa *looped*, persamaan (2.11) dapat ditulis kembali dengan bentuk:

$$M_{all} \begin{pmatrix} P_a \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_a \\ U_a \end{pmatrix} \tag{12}$$

Solusi dari (P_a, U_a) dari persamaan (2.12) adalah tidak nol jika determinan dari matriks $(M_{all} - E)$ adalah nol, yakni jika

$$(m_{11} - 1)(m_{22} - 1) - m_{12}m_{21} = 0 \tag{13}$$

dimana E adalah matriks satuan dan m_{ij} adalah bagian dari M_{all} . Oleh karena itu, dengan penyelesaian persamaan (13), kita memperoleh kondisi dari stabilitas limit dari induksi osilasi gas spontan pada *looped tube*.

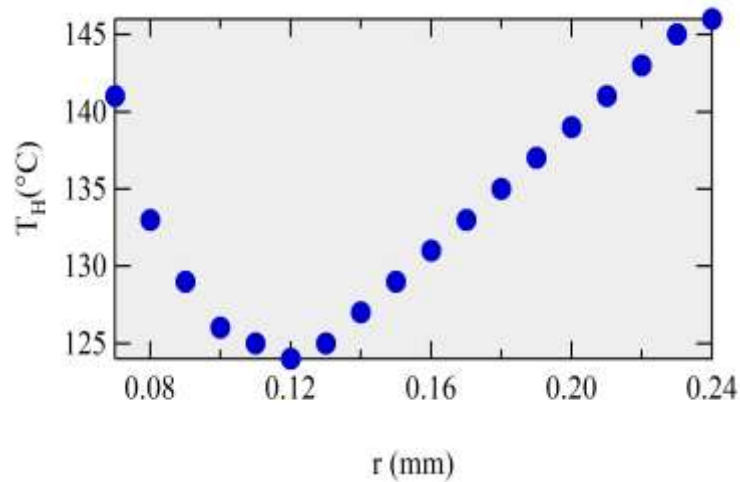
3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini adalah penelitian perhitungan numerik. Perhitungan numerik ini perlu di validasi dengan hasil eksperimen. Penelitian ini divalidasi dengan eksperimen dari penelitian yang dilakukan oleh Yazaki pada tahun 2002. *Acoustic field* yang diukur secara eksperimen didalam pipa loop dikembangkan oleh Yazaki dkk [16].

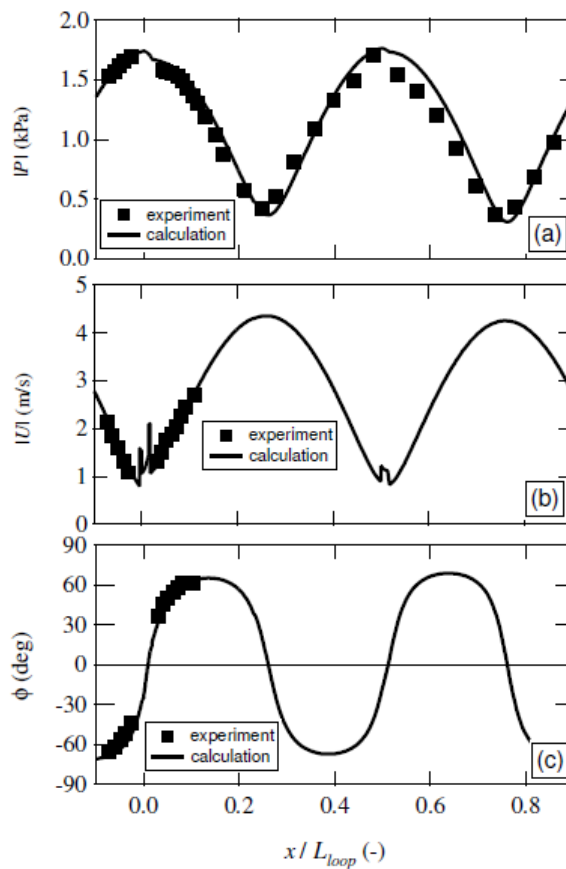
Pada gambar 6 secara numerik diperoleh $|P|$, $|U|$ dan argumen dari impedansi $Z (= P/U)$, ϕ , sepanjang pipa *loop* yang ditandai oleh garis hitam yang merupakan hasil perhitungan numerik dan simbol kotak hitam yang merupakan hasil dari eksperimen. Hasil ini diperoleh berdasarkan

konfigurasi dan geometri yang dihasilkan oleh Yazaki. Fluida kerja yang dipake adalah udara pada tekanan 0.51 MPa. Amplitudo tekanan P pada ujung ambien dari *stack* mesin di atur pada tekanan 1.7 kPa dalam penghitungan ini. Sebagaimana dalam gambar tersebut, terlihat kesesuaian dalam perhitungan numerik dan hasil eksperimen.

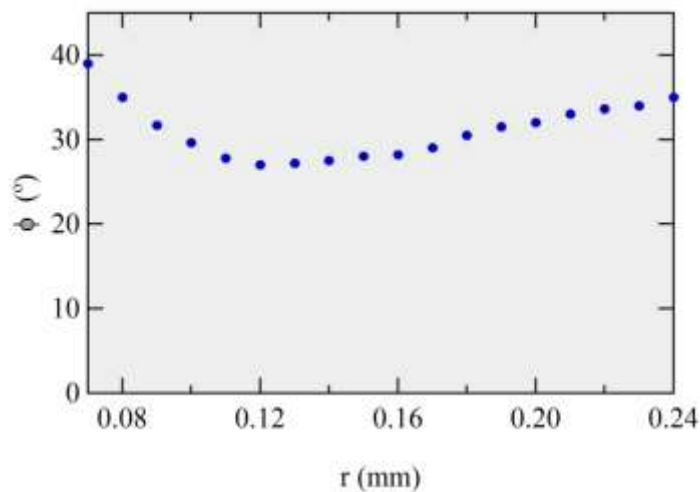
Berdasarkan gambar 7 dapat terlihat bahwasanya nilai daya pemanasan suhu terendah didapatkan ketika jari-jari *stack* bernilai 0.12 mm. Hal tersebut dikarenakan pada gambar 7 juga terlihat bahwa nilai beda fase pada *stack* dengan jari-jari 0.12 mm bernilai rendah, yakni mendekati 27 derajat nilai tersebut dapat dikategorikan sebagai nilai beda fase yang mendekati gelombang berjalan, sehingga disipasinya kecil dan suhu panas yang dibutuhkan untuk beresilasi juga kecil.



Gambar 6 fungsi T_H terhadap r



Gambar 5 $|P|$, $|U|$ dan ϕ sebagai fungsi x/L_{loop}



Gambar 7 fungsi beda fase terhadap r

4. Simpulan

Berdasarkan perhitungan numerik suhu pemanasan minimum untuk menggerakkan mesin termoakustik adalah 124°C, dimana jari-jari mesin *stack* adalah 0,12 mm. Nilai tersebut adalah nilai dimana suhu panas bumi rendah yang awalnya terbuang dapat dimanfaatkan menggunakan mesin termoakustik.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih saya haturkan kepada Ibu Irna Farikhah, Ph.D dan Bapak Nur Khoiri, S.Pd., M.T., M.Pd selaku dosen pembimbing satu dan dua.

Daftar Pustaka

- [1] Saptadji, Neni. 2001. *Energi Panas Bumi (Geothermal Energy)*. Diktat Penunjang Pendidikan. ITB
- [2] Setiawan, I .dkk. 2015. *Pembuatan dan Pengujian Prime mover Termoakustik Tipe Gelombang Tegak*. Prosiding Seminar Nasional XIV (SNTTM XIV), Banjarmasin, 7-8 Oktober 2015
- [3] Swift G W 2002 *Acoustical Society of America*, New York
- [4] Varian, G.A.I. 2011. *Karakteristik Termoakustik Berdasarkan Variasi Model Stack: Suatu Studi Mengenai Variasi Model Stack*. Skripsi diterbitkan. Depok: Universitas Indonesia
- [5] Farikhah I, Uueda Y 2017 *J. Appl.Sciences* **7** 7 p 672
- [6] Normah M G at.al 2013 *Procedia Engineering* **56** p 829
- [7] Farikhah I 2018. *Optimization of a heat driven thermoacoustic cooler in a looped tube with two stack*. Unpublished Thesis Ph.D. Tokyo University of Agriculture and Technology.
- [8] Rott N. 1969 *Z Angew. Math.Phys.* **20** p 230.
- [9] Yazaki et.al 1988 *Phys.Rev.Lett.* **81** p 3128
- [10] Ueda Y, Kato C 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** p 851
- [11] Ueda Y 2008 *J. Power and energy system* **2** p 1276
- [12] Rott N 1975 *Z angew Math. Phys.* **26** p 43
- [13] Swift G W 2006 “*Springer Handbook of Acoustics*”: Thermoacoustic. Springer: New York, USA
- [14] Farikhah I, Uueda Y 2017 *Appl.Sci* **7** p 672
- [15] Tominaga A 1995 *Cyrogenic.* **35** p 427
- [16] Yazaki et.al 2002 *App. Phys. Let.* **81** p 157-159