

Studi Eksperimental *Standing Wave* Termoakustik Generator dengan Variasi Diameter Inti Termoakustik dan Kalor Input

Raihan Kausar Nirwan^{1*}, Joko Waluyo²

^{1,2} Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika 2 Yogyakarta Indonesia

^{1*}raihan.kausar.nirwan@mail.ugm.ac.id

²jokowaluyo@ugm.ac.id

Abstrak— Semakin berkembangnya teknologi menuntut dibutuhkannya sumber energi baru yang ramah lingkungan dan bisa diandalkan. Salah satu sumber energi potensial yang masih belum banyak digunakan adalah energi panas buang. Sistem termoakustik merupakan salah satu sistem yang dapat memanfaatkan panas buang yang ada di lingkungan untuk menjadi sumber energi baru yang ramah lingkungan. Sistem termoakustik merubah energi panas menjadi energi suara untuk dimanfaatkan dalam pembangkitan energi. Pada penelitian skala lab ini bertujuan untuk melakukan pengujian terhadap pengaruh diameter inti dari termoakustik dan besaran kalor input yang diberikan pada sistem terhadap kinerja yang dihasilkan oleh suatu sistem termoakustik. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa ukuran diameter inti termoakustik dan besaran kalor input yang dimasukkan ke dalam sistem akan sangat berpengaruh terhadap kinerja dari suatu sistem termoakustik.

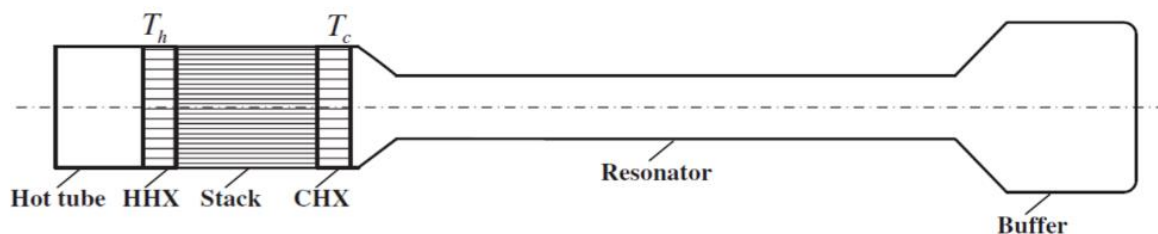
Kata kunci— Termoakustik generator, diameter inti termoakustik, cold heat exchanger, hot heat exchanger, panas buang

Abstract— New energy resources that are environmentally friendly and reliable is needed as the growth of technology. One of the potential energy resources that is still not widely used is waste heat energy. Thermoacoustic system is a system that can utilize waste heat in the environment to become a new source of environmentally friendly energy. Thermoacoustic system can converts heat energy into sound energy to be used in energy generation. In this lab-scale research, the aim is to test the effect of thermoacoustic core diameter and amount of heat input that given to the system to the output that produced by thermoacoustic system. Based on the research that has been done, it is found that thermoacoustic core diameter and amount of heat input that given into the system will greatly affect the performance of a thermoacoustic system.

Keywords— Thermoacoustic generator, thermoacoustic core diameter, cold heat exchanger, hot heat exchanger, heat waste.

I. PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya teknologi dan majunya peradaban manusia menyebabkan peningkatan kebutuhan akan energi menjadi tidak terelakkan. Indonesia dengan jumlah penduduk terbanyak keempat di dunia yang memiliki rata - rata pertumbuhan ekonomi mencapai 5,1 persen [5] tentunya membutuhkan sumber energi baru yang ramah lingkungan yang dapat menggantikan sumber energi fosil. Salah satu sumber energi yang saat ini belum banyak dimanfaatkan untuk kepentingan luas adalah sumber energi yang berasal dari kalor buang. Salah satu teknologi untuk memanfaatkan banyaknya kalor buang yang terbuang sia – sia di lingkungan adalah sistem termoakustik generator. Sistem termoakustik generator adalah suatu sistem yang memanfaatkan perbedaan temperatur untuk dapat diubah menjadi gelombang akustik sehingga dapat dimanfaatkan dalam bentuk energi lain seperti energi listrik, dimana fenomena tersebut biasa disebut dengan fenomena termoakustik [7].



Gambar 1. Sistem termoakustik engine *standing wave* [9]

Sistem termoakustik secara garis besar memiliki lima bagian inti seperti yang terlihat pada Gambar 1. Bagian inti dari sistem termoakustik antara lain *stack*, *hot heat exchanger* (HHX), *cold heat exchanger* (CHX), tabung resonator serta *hot tube* [9]. Fenomena termoakustik dapat terjadi apabila perbedaan temperatur pada daerah *stack* yang memiliki temperatur tinggi (HHX) dan daerah *stack* bertemperatur rendah (CHX) telah melampaui temperatur minimal untuk menciptakan gelombang akustik. Gelombang akustik dapat terjadi dikarenakan terjadinya osilasi pada fluida kerja yang diakibatkan oleh tereksansi dan terkompresinya fluida kerja selama melewati HHX dan CHX akibat adanya perbedaan temperatur [12]. Pemanfaatan kalor *input* yang optimal merupakan kunci kinerja dari suatu sistem termoakustik. Optimalisasi sistem termoakustik pada penelitian ini dilakukan dengan cara merubah diameter inti dari sistem termoakustik untuk memperlancar aliran fluida kerja sehingga perpindahan panas akan berlangsung lebih baik. Penelitian ini menitik beratkan pada karakterisasi unjuk kerja sistem termoakustik generator *standing wave* dengan peningkatan diameter inti termoakustik serta kapasitas kalor input yang digunakan untuk menghasilkan kinerja sistem termoakustik yang lebih optimal.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan melakukan perancangan dan fabrikasi sistem termoakustik generator dengan pengoptimalan diameter inti menjadi 108 mm dari sistem terdahulu yang hanya sebesar 53 mm. Pembesaran diameter inti termoakustik diikuti dengan penambahan kapasitas kalor *input* dari sistem termoakustik dari berjumlah maksimal 12 buah *glow plug* menjadi berjumlah maksimal 16 buah *glow plug*.



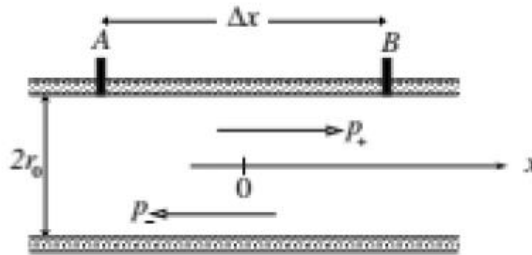
Gambar 2. Sistem termoakustik generator 108 mm

Performa suatu sistem termoakustik tidak dapat dipisahkan dari penggunaan fluida kerja yang baik untuk memaksimalkan fenomena osilasi pada fluida kerja. Fluida kerja yang baik akan mampu menyerap dan membuang kalor dengan baik sehingga fluida kerja dapat berekspansi dan kompresi dengan optimal. Pada penelitian ini menggunakan fluida kerja berupa udara lingkungan dengan temperatur kamar sebesar 27°C dan berada pada tekanan 1 atm. Detail kondisi eksperimental dan sifat fluida kerja yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada tabel 1.

TABEL I
KONDISI EKSPERIMENTAL SISTEM TERMOAKUSTIK GENERATOR

Kondisi Eksperimental	
Medium perpindahan (Fluida Kerja)	Udara
Temperatur operasi udara	27 °C
Tekanan udara	1 atm
Sifat – sifat udara pada 27 °C	
Kalor jenis udara (C_p)	1,005 kJ/kh.K
Densitas (ρ)	1,1614 kg/m ³
Konduktivitas termal (k)	0,00002588 kW/m.K

Kinerja dari sistem termoakustik pada penelitian ini akan diketahui dari beberapa parameter penilaian. Untuk dapat menghasilkan suatu data yang akurat maka fenomena termoakustik yang terjadi pada penelitian ini akan diukur menggunakan metode pengukuran dua sensor yang telah dikembangkan oleh Biwa pada tahun 2008 [3]. Metode pengukuran ini akan menempatkan dua sensor *pressure transducer* sejauh jarak Δx dimana Δx harus lebih kecil dibandingkan dengan panjang gelombang bunyi yang dihasilkan.



Gambar 3. Metode Dua Sensor [3]

Pengukuran intensitas gelombang akustik yang dihasilkan dengan menggunakan metode dua sensor oleh Biwa dengan jarak $x = \pm \Delta x / 2$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$p_+ + p_- = \frac{p_A + p_B}{2 \cos\left(\frac{k\Delta x}{2}\right)} \quad (1)$$

$$p_+ - p_- = \frac{p_A - p_B}{2i \sin\left(\frac{k\Delta x}{2}\right)} \quad (2)$$

Dimana p_+ merupakan amplitudo tekanan searah positif dan p_- merupakan amplitudo tekanan searah negatif. Sehingga intensitas daya akustik yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$I = \frac{1}{8\omega\rho} \{I_m[H](|p_A|^2 - |p_B|^2) + 2 R_e[H]|p_A||p_B|\sin\theta\} \quad (3)$$

Dimana θ adalah beda fase dari gelombang akustik yang dihasilkan serta PA yang merupakan amplitudo tekanan yang terekam pada sensor A dan PB merupakan amplitudo tekanan yang terekam pada sensor B. Untuk mendapatkan daya akustik pada sistem termoakustik, maka dapat menggunakan persamaan

$$\dot{E} = I A \quad (4)$$

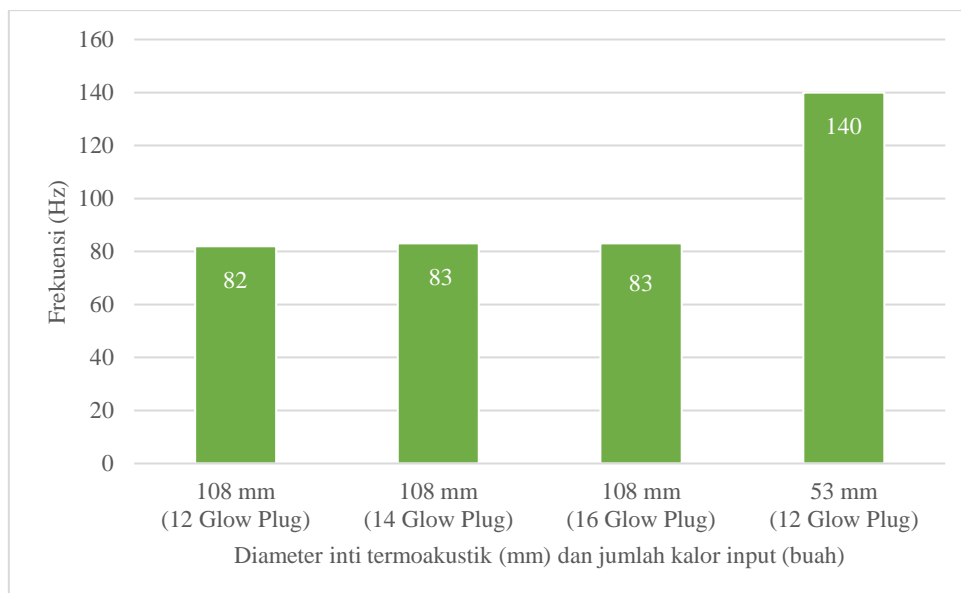
dimana I adalah intensitas daya akustik yang dihasilkan dan A merupakan luas penampang dari tabung resonator yang digunakan pada sistem.

III. HASIL

Pada penelitian ini menggunakan beberapa parameter penilaian untuk mengetahui seberapa efektif dan optimal sistem termoakustik dapat memanfaatkan energi kalor input untuk dirubah menjadi gelombang akustik. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah frekuensi gelombang akustik yang dihasilkan, intensitas daya akustik yang dihasilkan, daya akustik, serta efisiensi termal dari sistem termoakustik.

a. Frekuensi Gelombang Akustik

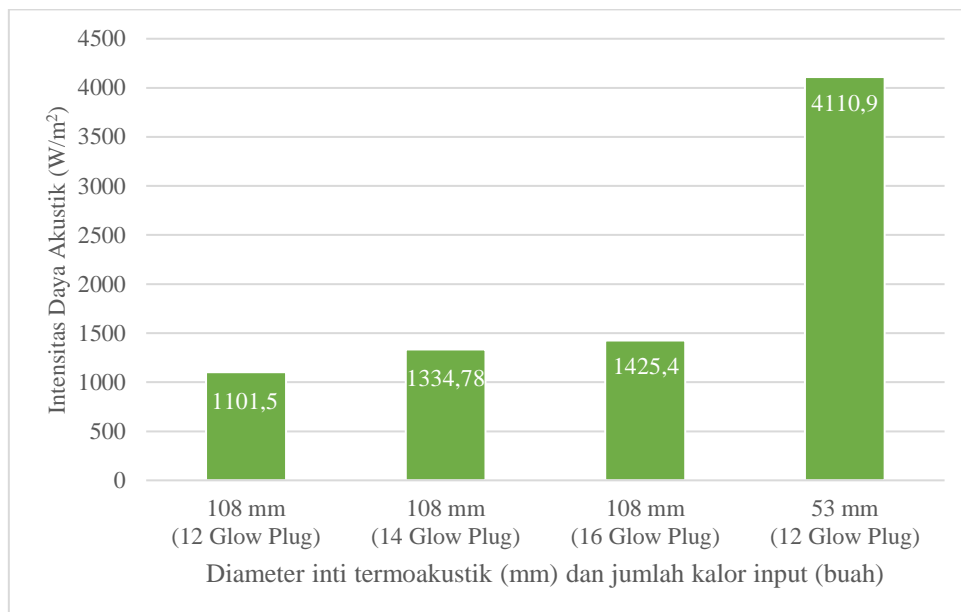
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa pada sistem berdiameter inti 53 mm yang diteliti oleh Kausar [8] pada tahun 2019 yang memiliki panjang tabung resonator 390 mm memiliki frekuensi gelombang akustik yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem pengembangan berdiameter inti termoakustik 108 mm dengan panjang tabung resonator 108 mm dalam segala variasi jumlah kalor *input* yang diberikan. Pada penelitian ini terlihat bahwa kalor *input* yang diberikan ke dalam sistem tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap frekuensi dari gelombang akustik yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi dari gelombang akustik yang dihasilkan akan sangat dipengaruhi oleh geometri inti sistem termoakustik khususnya pada geometri tabung resonator yang digunakan.



Gambar 4. Grafik perbandingan frekuensi gelombang akustik dengan diameter inti termoakustik dan jumlah kalor input

b. Intensitas Daya Akustik

Intensitas daya akustik merupakan besaran yang menunjukkan seberapa besar gelombang akustik mampu menghasilkan daya akustik per besaran luas penampang sistem termoakustik yang digunakan. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang memiliki diameter inti 53 mm dengan panjang tabung resonator 390 mm yang diteliti oleh Kausar [8] memiliki intensitas daya akustik yang jauh lebih besar dibandingkan dengan seluruh variasi kalor *input* pada sistem termoakustik berdiameter inti sebesar 108 mm dan panjang tabung resonator 780 mm. Selain itu sistem termoakustik dengan diameter inti termoakustik 108 mm memiliki hasil terbaik pada variasi sistem dengan jumlah kalor input sebesar 16 buah *glow plug* dimana semakin tinggi kalor *input* akan semakin tinggi pula intensitas daya akustik yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa intensitas daya akustik yang dihasilkan oleh sistem akan sangat dipengaruhi oleh geometri dari inti termoakustik yang digunakan serta besaran kalor *input* yang diberikan kepada sistem.

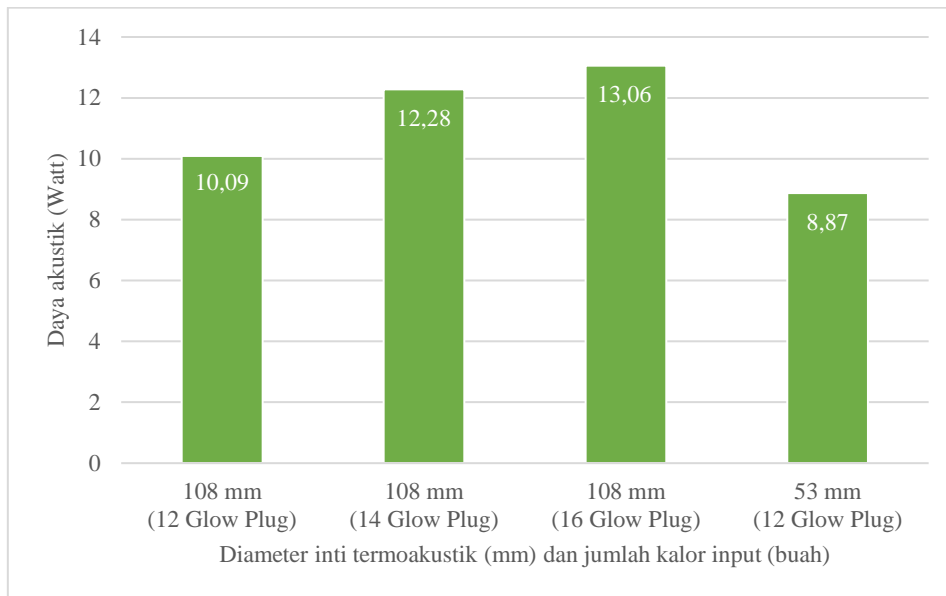


Gambar 5. Grafik perbandingan intensitas daya akustik dengan diameter inti termoakustik dan jumlah kalor input

c. Daya Akustik

Daya akustik merupakan suatu parameter untuk mengetahui seberapa baik *output* yang dihasilkan oleh suatu gelombang akustik. Daya akustik merupakan perkalian antara intensitas daya akustik yang dihasilkan oleh sistem dengan luas penampang dari suatu sistem termoakustik. Semakin besar daya akustik yang dihasilkan maka akan semakin baik *output* kinerja dari suatu sistem termoakustik.

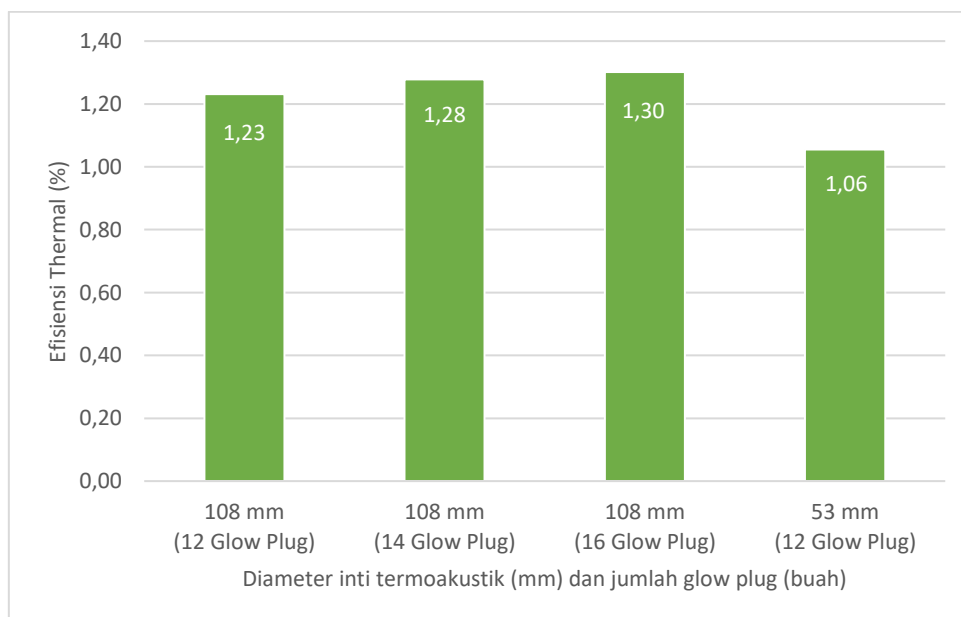
Berdasarkan hasil yang didapatkan pada penelitian ini, diameter inti termoakustik dan kalor *input* yang diberikan ke dalam sistem akan sangat mempengaruhi daya akustik yang dihasilkan oleh sistem. Sistem termoakustik dengan diameter inti termoakustik sebesar 108 mm dan memiliki besaran kalor *input* sebesar 16 buah *glow plug* mampu menghasilkan daya akustik yang paling baik diantara seluruh variasi sistem yang ada. Sedangkan sistem termoakustik yang memiliki diameter inti 53 mm yang diteliti oleh Kausar [8] memiliki daya akustik terendah dibandingkan seluruh sistem yang ada. Dimana semakin besar kalor *input* yang diberikan ke dalam sebuah sistem maka akan semakin besar pula daya akustik yang akan dihasilkan oleh sistem tersebut yang diakibatkan oleh perbedaan temperatur yang semakin tinggi antara HHX dan CHX.



Gambar 5. Grafik perbandingan daya akustik dengan diameter inti termoakustik dan jumlah kalor *input*

d. Efisiensi Termal

Parameter efisiensi termal merupakan besaran yang digunakan untuk mengetahui seberapa optimal kalor *input* yang diberikan ke dalam sistem mampu dirubah menjadi gelombang akustik. Semakin besar efisiensi termal maka akan semakin optimal sistem termoakustik bekerja. Pada penelitian ini efisiensi termal akan dilakukan dengan menghitung perbandingan kalor *input* yang diberikan ke dalam sistem dengan daya akustik yang dihasilkan oleh sistem termoakustik. Kalor *input* yang diberikan bervariasi yaitu sejumlah 12, 14, dan 16 buah *glow plug* pada variasi termoakustik berdiameter 108 mm dan *glow plug* sejumlah 12 buah pada variasi termoakustik berdiameter 53 mm pada penelitian Kausar [8]. Kalor *input* yang diberikan pada sistem diukur melalui besaran daya listrik yang dibutuhkan untuk memanaskan *glow plug* guna memberikan kalor ke dalam sistem.



Gambar 5. Grafik perbandingan efisiensi termal dengan diameter inti termoakustik dan jumlah kalor input

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, sistem dengan diameter inti termoakustik sebesar 108 mm pada segala variasi memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem yang memiliki diameter inti termoakustik sebesar 53 mm pada penelitian Kausar [8]. Sistem dengan diameter inti termoakustik sebesar 108 mm dan dengan jumlah kalor *input* sebanyak 16 buah *glow plug* memiliki efisiensi termal tertinggi dibandingkan dengan segala jenis variasi sistem yang ada. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya kalor yang diinputkan ke dalam sistem maka akan semakin optimal pula sistem HHX dalam memanaskan fluida kerja sehingga kinerja sistem termoakustik akan semakin optimal.

IV. PEMBAHASAN

Suatu sistem termoakustik dapat dikatakan memiliki performa yang optimal apabila memiliki daya akustik dan efisiensi termal yang tinggi. Daya akustik dan efisiensi termal yang tinggi menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu merubah kalor yang diinputkan ke dalam sistem menjadi gelombang akustik secara optimal dengan tidak banyaknya kalor *input* yang terbuang secara sia – sia ke lingkungan. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem dengan diameter inti 108mm dengan jumlah *glow plug* sebanyak 16 buah memiliki kinerja yang paling optimal dibanding sistem yang lain.

a. Frekuensi Gelombang Akustik

Gelombang akustik yang dihasilkan oleh suatu sistem termoakustik pada umumnya bekerja pada frekuensi resonansi order pertama yang mengakibatkan disipasi daya akustik akan menjadi lebih rendah sehingga efisiensi sistem termoakustik menjadi lebih baik dan kinerja dari sistem termoakustik menjadi lebih optimal [1]. Frekuensi dari gelombang akustik yang dihasilkan pada suatu sistem termoakustik akan sangat dipengaruhi oleh geometri dari tabung resonator yang digunakan. Penelitian yang dilakukan Balonji dkk pada tahun 2019 [2] menunjukkan hasil bahwa frekuensi gelombang akustik yang dihasilkan oleh sistem termoakustik akan sangat dipengaruhi oleh geometri dari tabung resonator yang digunakan. Semakin panjang tabung resonator yang digunakan maka akan semakin rendah frekuensi gelombang akustik yang dihasilkan oleh sistem. Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin panjang tabung resonator tempat merambatnya gelombang akustik yang dihasilkan maka penetrasi viskos akan semakin tinggi sehingga menyebabkan frekuensi gelombang akustik yang dihasilkan akan menjadi lebih rendah [4]. Hal ini berlaku pula pada penelitian ini dimana sistem termoakustik yang memiliki diameter inti 108 mm dengan panjang tabung resonator 780 mm memiliki frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang memiliki diameter inti 53 mm dengan panjang tabung resonator 390 mm.

b. Intensitas Daya Akustik

Intensitas daya akustik yang dihasilkan oleh sistem dapat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti amplitudo tekanan, luas penampang, geometri tabung resonator yang digunakan, frekuensi gelombang akustik, dan beda fase dari gelombang akustik yang dihasilkan oleh sistem termoakustik [3]. Sistem termoakustik yang memiliki diameter inti 108 mm dengan jumlah *glow plug* 16 buah memiliki intensitas daya akustik yang paling besar diantara seluruh variasi jumlah kalor input pada ukuran diameter inti termoakustik yang sama. Hal ini dikarenakan pada kondisi steady pada rentang waktu yang sama, sistem yang memiliki kalor input lebih besar akan mampu menciptakan perbedaan temperatur yang lebih tinggi. Perbedaan temperatur yang lebih tinggi akan mampu menciptakan osilasi yang lebih optimal pada fluida kerja sistem termoakustik.

c. Daya Akustik

Daya akustik merupakan suatu parameter yang memiliki kaitan erat dengan intensitas daya akustik dan geometri penampang termoakustik. Dimana daya akustik merupakan perkalian antara intensitas daya akustik

dan luas penampang termoakustik [6]. Daya akustik dapat dihasilkan pada sistem termoakustik dikarenakan adanya peristiwa kompresi dan ekspansi saat fluida kerja bergerak melalui HHX dan CHX. Peristiwa ekspansi dan kompresi yang terjadi secara terus menerus akan mengakibatkan fluida kerja akan mengalami osilasi dan merambat melalui tabung resonator sehingga tercipta fenomena termoakustik [10].

d. Efisiensi Termal

Efisiensi termal dalam suatu sistem termoakustik akan sangat dipengaruhi oleh pemilihan bahan pembuatan dari masing – masing komponen termoakustik khususnya pada bagian *stack*, HHX, CHX dan tabung resonator. Komponen pada inti HHX dan CHX sebaiknya menggunakan bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi sehingga perpindahan panas dari *glow plug* sebagai sumber panas kepada inti HHX akan menjadi optimal sehingga mengurangi rugi – rugi kalor disana. Selain itu penggunaan bahan yang memiliki konduktivitas yang tinggi juga dibutuhkan pada komponen inti CHX sehingga panas pada CHX mampu dibuang secara lebih optimal ke lingkungan. Hal ini dikarenakan apabila HHX dan CHX memiliki konduktivitas yang baik maka perbedaan temperatur yang dihasilkan oleh sistem termoakustik akan menjadi semakin lebih baik. Selain penggunaan bahan yang memiliki konduktivitas tinggi pada bagian inti HHX dan CHX, penggunaan bahan yang memiliki konduktivitas termal yang rendah juga dibutuhkan dalam perancangan suatu sistem termoakustik khususnya pada bagian penutup *stack*, HHX dan CHX serta bahan pembuat dari tabung resonator. Pada bagian ini diperlukan bahan yang memiliki konduktivitas yang rendah agar panas yang terkandung di dalam sistem termoakustik tidak keluar ke lingkungan. Selain pemilihan bahan penyusun sistem termoakustik, untuk dapat meningkatkan efisiensi termal dari sistem dapat menggunakan bahan isolasi yang diberikan di luar sistem untuk mencegah kalor terbuang secara sia – sia ke lingkungan. Isolasi panas dapat dilakukan dengan menggunakan aluminium atau serabut keramik tahan panas. Selain itu penggunaan sumber energi kalor input yang rendah daya akan semakin meningkatkan efisiensi dari suatu sistem termoakustik.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian pengembangan sistem termoakustik generator *standing wave* dengan diameter inti termoakustik sebesar 108 mm dan peningkatan jumlah kalor *input* menjadi sebanyak 16 buah *glow plug*, didapatkan kesimpulan bahwa sistem termoakustik generator dengan diameter inti sebesar 108 mm memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan sistem termoakustik yang memiliki diameter inti sebesar 53 mm pada penelitian yang dilakukan oleh Kausar pada tahun 2019 [8]. Hal ini ditunjukkan dalam beberapa aspek seperti daya akustik yang dihasilkan serta efisiensi termal dari sistem termoakustik. Selain itu sistem termoakustik dengan diameter inti 108mm memiliki frekuensi gelombang akustik yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem berdiameter inti 53mm yang sangat berkaitan dengan geometri dari tabung resonator yang digunakan. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa geometri dari sistem termoakustik dan jumlah kalor input yang diberikan kepada sistem memiliki pengaruh yang signifikan terhadap output dari sistem termoakustik. Hal ini dikarenakan semakin besar kalor input yang diberikan kepada sistem maka akan semakin besar pula perbedaan temperatur yang dapat dihasilkan oleh sistem sehingga kinerja sistem termoakustik akan menjadi lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam menjalankan penelitian ini tentunya melibatkan bantuan dari berbagai pihak sehingga penelitian ini dapat berlangsung dengan baik. Terimakasih saya ucapkan kepada bapak Joko Waluyo, bapak Adhika Widyaparaga, bapak Sugiyanto, dan bapak Isworo Djati yang telah membantu saya dalam menyelesaikan penelitian ini sehingga penelitian dapat diselesaikan dengan hasil yang baik.

REFERENSI

- [1] Arafa N.M, "Toward a Better Performance of Thermoacoustic Devices", Master of Science. thesis, Cairo University, Giza, Egypt, 2010.
- [2] Balonji S, Alcock A.C, Tartibu L.K, and Jen C.T, "Performance Alteration of Standing Wave Thermoacoustically Driven Engine Through Resonator Length Adjustment", University of Johannesburg, South Africa, 2019.
- [3] Biwa T., Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda, and T. Yazaki, "Experimental Verification of Two-Sensor Acoustic Intensity Measurements in Lossy Ducts", J. Acoust. Soc. Am., 124(3):1584-1590, 2008.
- [4] Cahyadi D, Adhitama Y, Setiawan I, and Utomo A, "Experimental Study of Resonance Frequency at Prime Mover Thermoacoustic Standing Wave", Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2017.
- [5] Dewan Energi Nasional, "Outlook Energi Indonesia 2019", Dewan Energi Nasional, Indonesia, 2019.
- [6] Hariharan N.M, Sivashanmugam P, and Kasthuriagan, "Effect of Resonator Length and Working Fluid on The Performance of Twin Thermoacoustic Heat Engine – Experimental and Simulation Studies", 10.1016/j.compsfluid.2013.01.019 engine, 10.1016/j.apacoust.2012.05.003, 2012.
- [7] Jaworski A.J, and Mao Xiaolan, "Development of Thermoacoustic Devices for Power Generation and Refrigeration", Proc IMechE Part A: J Power and Energy 227(7) 762–782, 2013.
- [8] Nirwan K.N, "Studi Eksperimental Standing Wave Thermoacoustic Generator Tipe Coaxial dengan Variasi Panjang Tabung Dalam Resonator", S.T. thesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2019.
- [9] Sun D, Wang K, Qiu L, Lai B, Li Y, dan Zhang X, 2014, *Theoretical and Experimental Investigation of Onset Characteristic of Standing Wave Thermoacoustic Engines Based on Thermodynamic Analysis*, J. Applied Acoustic 81, pp. 50-57
- [10] Swift, G.W, "Thermoacoustic Engine", Editor M. J.Crocker, Encyclopedia of Acoustic, John Willey & Sons, New York, 1998.
- [11] Yu Zhibin, Saechan P, and Jaworski A.J, "A Method of Characterising Performance of Audio Loudspeakers for Linear Alternator Applications in Low-Cost Thermoacoustic Electricity Generators", University of Manchester, UK, 2010.