

KARAKTERISTIK *STANDING-WAVE HEAT ENGINE THERMOACOUSTIC* BERDASARKAN VARIASI ONSET TEMPERATUR

Adi Surjosatyo^{1,*}, Duago Pijar Wicaksono²

Departemen Teknik Mesin – Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia
Email:adisur@eng.ui.ac.id

Abstrak

Heat engine thermoacoustic mengkonversi panas menjadi daya akustik tanpa adanya komponen yang bergerak. Untuk mengembangkan lebih jauh performa dari termoakustik jenis ini, maka diperlukan karakterisasi dari parameter-parameter yang bekerja. Pada pengujian kali ini dilakukan karakterisasi termoakustik berdasarkan posisi *stack* dan *onset temperature* dengan tujuan untuk mengetahui posisi *stack* dan besaran nilai *onset temperature* yang optimal. Variasi yang dilakukan pada pengujian ini untuk posisi *stack* yaitu pada posisi 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 mm dari ujung tabung tertutup, sedangkan untuk variasi onset temperatur dilakukan pada suhu awal termoakustik mulai bekerja (terendah 395⁰C) sampai 500⁰C. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *stack* yang terbuat dari bahan dasar keramik dan menggunakan pemanas berbentuk *nozzle* serta panjang resonator 200 mm. Kecenderungan daya akustik yang dihasilkan mempunyai kemiripan dengan persamaan yang diusulkan oleh *Swift et al [1]*, dengan daya terbesar yang dihasilkan terjadi pada saat posisi *stack* 50 mm dari ujung tabung tertutup dan *onset temperature* 500⁰C sebesar $9,81 \times 10^{-4}$ Watt.

Kata kunci : Engine, ceramic, *stack*, *onset*, intensity, power

Pendahuluan

Ilmu pengetahuan alam memberikan peran penting dalam perkembangan teknologi dan kualitas hidup manusia. Pengkajian terhadap suatu fenomena alam tertentu untuk menemukan karakteristik dan aspek-aspek penting dalam suatu fenomena alam dapat menunjang perkembangan ilmu pengetahuan yang nantinya juga akan berpengaruh pada perkembangan teknologi. Seperti yang telah dilakukan oleh Thomas Alfa Edison yang meneliti kumparan kawat yang dialiri arus listrik sampai akhirnya ditemukan lampu pijar yang baik hingga terus berkembang sampai sekarang sampai hampir semua orang dapat menikmati penerangan lampu pada masa sekarang. Untuk perkembangan ilmu pengetahuan yang lebih lanjut perlu dilakukan pengkajian-pengkajian terhadap fenomena-fenomena lain yang terjadi pada berbagai peristiwa.

Peristiwa osilasi udara yang terjadi pada silinder akibat perbedaan suhu di kedua sisi tabung yang diteliti oleh *soundhauss* [8] merupakan kajian baru ilmu pengetahuan yang menarik untuk diamati dan diteliti, yang nantinya diharapkan dapat berkembang menjadi ilmu terapan baru yang dapat diaplikasikan secara luas untuk kepentingan

peningkatan kesejahteraan kehidupan manusia. Demi perkembangan selanjutnya dari penelitian dan pemanfaatan termoakustik ini maka karakterisasi terhadap variabel-variabel yang berperan dalam peristiwa termoakustik ini sangatlah penting untuk dilakukan. Yang mana karakterisasi ini diharapkan akan memberikan gambaran yang lebih lengkap terhadap fenomena termoakustik, yang masih tergolong baru dalam ilmu keteknikan.

Dalam fenomena termoakustik terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi daya akustik yang dihasilkan. Diantarnya posisi *stack* dan suhu masuk di kedua sisi *stack*. Bagaimana pengaruh posisi *stack* dan suhu terhadap daya akustik yang dihasilkan merupakan kajian untuk penelitian ini. Dalam penelitian ini menggunakan tabung *resonator* dari tabung *pyrex*, dan *stack* terbuat dari keramik. Sedangkan sumber panas berasal dari pemanas listrik dan pendinginan menggunakan kapas yang dibasahi dengan air. Untuk mengetahui performa dari termoakustik yang dibangun, maka harus diketahui parameter yang berpengaruh terhadap kinerja suara yang dihasilkan. beberapa parameter tersebut seperti

panjang *stack* dan posisi *stack*, panjang *resonator*, dan perbedaan suhu antara kedua sisi *stack*.

Dasar Teori

Untuk mendapatkan karakter dari daya akustik pada *standing-wave* termoakustik maka perlu diperhatikan karakter tiap bagian. Bagian yang perlu diketahui adalah penukar kalor, *stack*, *resonator*, dan fluida kerja

Penukar Kalor

Penukar kalor panas menyuplai panas pada sisi *stack* yang berada dekat sisi tertutup sedangkan penukar kalor dingin mengekstrak panas kelingkuangan untuk menjaga gradien suhu di *stack*. Bagian terpenting dari penukar panas adalah jarak antar plat dan ketebalan penukar kalor yang akan berpengaruh pada *blokage ratio* (akan dijelaskan kemudian). Diasumsikan bahwa koefisien perpindahan kalor dan perbedaan suhu antara plat dan fluida sama, maka penukar kalor tipe panas membutuhkan area perpindahan kalor lebih besar dibandingkan dengan penukar kalor dingin. Sehingga panjang penukar kalor panas dua kali lipat atau lebih dari penukar kalor dingin[2]. *Plate space optimal* dan panjang penukar kalor panas sama dengan jarak *peak to peak* dari fluida kerja yang diberikan pada persamaan.

$$y_0 = 2l \frac{a}{A} \tag{1}$$

$$l_c = \frac{P_0}{a\omega\rho_m} \sin(kl) \tag{2}$$

Dimana y_0 adalah setengah *plate spacing*(m), l setengah ketebalan plate (m), a kecepatan suara (m/s), A luas area *stack* (m²) l_c panjang penukar kalor (m), P_0 tekanan *ambient*, ω frekuensi angular (rad), ρ_m densitas plat dan k koefisien konduktifitas (W/mK).

Stack

Stack adalah bagian terpenting dalam termoakustik *engine*, di mana siklus termoakustik dihasilkan. *stack* mempunyai kapasitas panas dan area penampang yang besar untuk menjaga kontak termal terjadi antara gas dan *stack solid*. *Stack* harus ditempatkan pada daerah khusus dalam tabung *resonator* agar dapat menghasilkan gelombang suara. *Stack* ditempatkan pada daerah dimana impedansi akustik $|Z|$ lebih besar dari $\rho_g a/A$ karena besar emplitudo kecepatan gas relatif kecil untuk mengurangi kehilangan disipasi *viscous* dari daya *viscous* [2]. Impedansi akustik didefinisikan sebagai rasio dari tekanan kompleks

terhadap kecepatan aliran volumetrik. Persamaan untuk impedansi akustik adalah sebagai berikut:

$$Z = \rho V \tag{3}$$

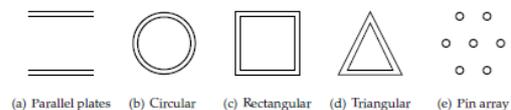
Stack yang baik harus bisa meminimalkan konduksi panas sepanjang *gradient* suhu dan disipasi *viscous* dari daya akustik. Ketebalan minimum *stack* harus $8\delta_s$ [3] dimana δ_s adalah kedalaman penetrasi termal padat didefinisikan sebagai

$$\Delta_s = \sqrt{\frac{2K_s}{\omega\rho_s c_s}} \tag{4}$$

Dimana K_s konduktifitas termal *solid* (W/ mK), ρ_s densitas rata-rata solid (kg/m³) dan c_s adalah kapasitas panas spesifik plate (J/ kg K). Persamaan di atas digunakan untuk menghitung ketebalan plate yang digunakan pada sistem yang dibuat. Ketebalan optimum berada pada kisaran 6-8 δ_s [4]. Kedalaman penetrasi termal didefinisikan sebagai layer disekitar *plate stack* dimana fenomena termoakustik terjadi. Sedangkan kedalaman penetrasi termal gas didefinisikan sebagai:

$$\Delta_s = \sqrt{\frac{2K_g}{\omega\rho_g c_g}} \tag{5}$$

Dengan menempatkan penukar kalor diantara kedua sisi *stack* maka akan tercipta *gradient* suhu sepanjang *stack* sehingga gelombang suara dapat ditimbulkan. Operasi termoakustik-*standing wave* yang berhasil membutuhkan kontak termal yang tidak sempurna antara material *stack* dan gas yang didapat ketika jarak antara *plate* dua sampai empat kali kedalaman penetrasi termal dari gas. Kedalaman penetrasi *viscous* didefinisikan sebagai ketebalan dari lapisan fluida sekitar plat *stack* yang ditahan oleh gaya *viscous*.



Gambar 1. Macam susunan *stack* (a) Parallel plates, (b) Circular, (c) Rectangular, (d) Triangular, (e) Pin array
Stack biasa disusun dalam bentuk plat paralel dengan pola susunan segitiga, kubus, atau pin. Jumlah plat yang disusun diberikan oleh Feng Wu et al[13] dalam persamaan yang masih ada hubungannya dengan panjang dan spasi antar plat:

$$N = \frac{R}{l+y_0} \tag{6}$$

Terdapat juga *Blokage Ratio*(BR) atau porositi didefinisikan sebagai rasio dari area yang tersedia di

gas dalam *stack* ke area total dari *stack* diberikan dalam persamaan:

$$BR = \frac{y_o}{l+y_o} \quad (7)$$

Resonator

Resonator merupakan bagian penting dalam termoakustik *standing-wave*. *Resonator* diharuskan halus, berbentuk silinder dan tanpa sambungan. Ketidak sejajaran pipa *resonator* dan permukaan yang kasar harus dihindari karena dapat menyebabkan pusaran aliran dan variasi tekanan sehingga membutuhkan analisa yang lebih kompleks.

Frekuensi dari suara yang dihasilkan bergantung dengan panjang *resonator*. Perpanjangan pipa *resonator* akan menurunkan frekuensi dari suara dengan daya pemanasan yang sama. Garrett memberikan persamaan untuk frekuensi termoakustik *standing-wave* sebagai berikut:

$$F = \frac{c}{4l} \quad (8)$$

Kecepatan amplitudo suara dari sisi panas ke sisi dingin *stack* akan meningkat seiring dengan pendinginan penukar kalor sisi dingin sepanjang tabung *resonator*.

Fluida Kerja

Pemilihan fluida kerja khususnya gas untuk mesin termoakustik *standing-wave* penting untuk pertimbangan efisiensi. Properti gas penting dalam menciptakan gelombang suara pada onset temperatur. Gas yang ringan mempunyai kecepatan suara dan konduktivitas termal yang memberikan efek peningkatan daya akustik karena kedalaman penetrasi termal yang tinggi, karena gas yang lebih berat menguap dan membeku pada suhu rendah atau mempunyai sifat tidak ideal.

Gas dengan rasio panas spesifik yang tinggi dan *Prandtl* number yang rendah cocok untuk termoakustik. Properti ini dapat dimaksimalkan dengan menggunakan campuran gas ringan dan berat. Campuran optimal gas di termoakustik bergantung pada tujuan aplikasi dan desain. Untuk mesin termoakustik, gas dengan *Prandtl* number mendekati 1 lebih baik untuk mencapai temperatur onset yang minimal. Pada kasus kali ini fluida yang digunakan adalah udara biasa.

Daya akustik

Efisiensi dari termoakusti di defenisikan sebagai rasio daya akustik yang dihasilkan dengan daya total yang diperlukan untuk menghasilkan suara di *stack*. Efisiensi dinyatakan dalam persamaan:

$$H_{eng} = \frac{\Delta E_2}{H_2} \quad (10)$$

dimana ΔE_2 adalah daya akustik yang dihasilkan oleh *stack* dan H_2 Total daya yang mengalir melalui *stack*. Masing-masing didefenisikan sebagai:

$$\Delta E_2 = \frac{1}{4\gamma} \delta_{kn} DR^2 \left[BR(\gamma - 1) \cos^2(x_{cn}) \left(\frac{\Gamma}{(1+\sqrt{\sigma})\Lambda} - 1 \right) - \frac{\sin^2 x_{cn} \sqrt{\sigma}}{BR x_{cn} \Lambda} \right] \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{1}{8\gamma} \delta_{kn} DR^2 \frac{\sin 2x_{cn}}{(1+\sigma)\Lambda} \left[\Gamma \frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma}{1+\sqrt{\sigma}} - (1 + \sqrt{\sigma} - \delta_{vn}) \right] \quad (12)$$

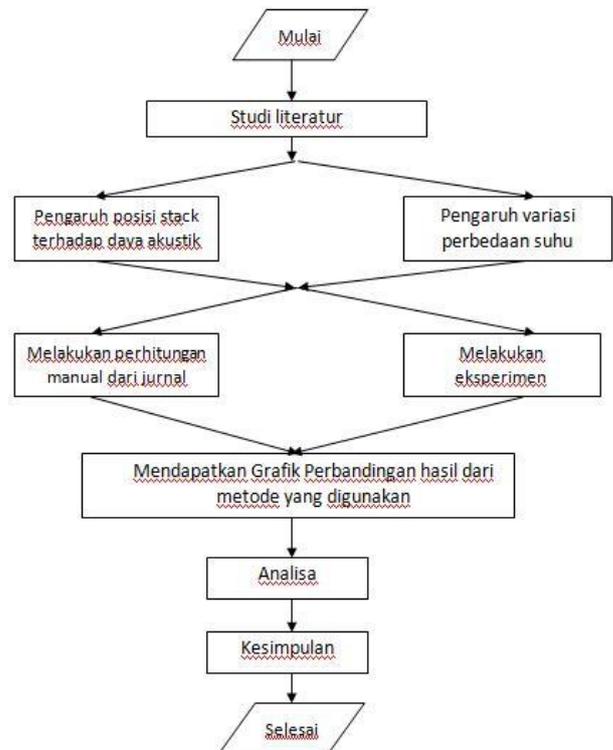
Dimana Λ dan Γ didefenisikan sebagai:

$$\Lambda = 1 - \sqrt{\sigma} \delta_{kn} + \frac{1}{2} \sigma \delta_{kn}^2 \quad (13)$$

$$\Gamma = \frac{\Delta T_n}{BR(\gamma-1)L_{sn} \cot(x_{cn})} \quad (14)$$

Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan analisa performa dari termoakustik berdasarkan dari perhitungan dan pengukuran dari eksperimen, kemudian diambil perbandingan dari pengolahan data dari kedua metode tersebut.



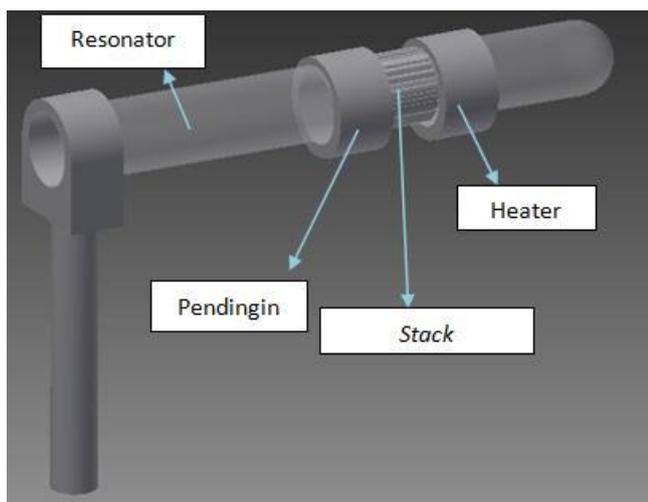
Gambar 2. Flowchart Penelitian Termoakustik

Variasi parameter yang dilakukan dari penelitian ini yaitu posisi *stack* pada tabung *resonator* dan perbedaan suhu pada sisi panas dan dingin (*onset temperature*) termoakustik. Posisi *stack* yang divariasikan yaitu pada titik 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,

dan 10 cm dari sisi tabung tertutup. Sedangkan untuk variasi pada perbedaan suhu dimulai pada titik suhu terendah pada saat termoakustik sudah mulai menghasilkan suara sampai 500°C. Berikut disertakan variasi suhu pada setiap posisi *stack*.

- 2 cm = 500, 530, 545, 560, 575 derajat Celcius
- 3 cm = 445, 460, 485, 500, 515, 530, 545 derajat Celcius
- 4 cm = 410, 425, 440, 455, 470, 485, 500, 515, 530 derajat Celcius
- 5 cm = 410, 425, 440, 455, 470, 485, 500 derajat Celcius
- 6 cm = 395, 410, 425, 440, 455, 470, 485, 500 derajat Celcius
- 7 cm = 410, 425, 440, 455, 470, 485, 500 derajat Celcius
- 8 cm = 425, 440, 455, 470, 485, 500 derajat Celcius
- 9 cm = 455, 470, 485, 500, 515, 530, 545 derajat Celcius
- 10 cm = 485, 500, 515, 530, 545 derajat Celcius

Konsep rancangan prototip dari penelitian termoakustik ini menggunakan rancangan dari penelitian - penelitian yang telah dilakukan sebelumnya untuk karakterisasi performa berdasarkan intensitas suara. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui performa termoakustik yang dipengaruhi dengan letak *stack* dan variasi perbedaan suhu pada sisi panas dan sisi dingin.



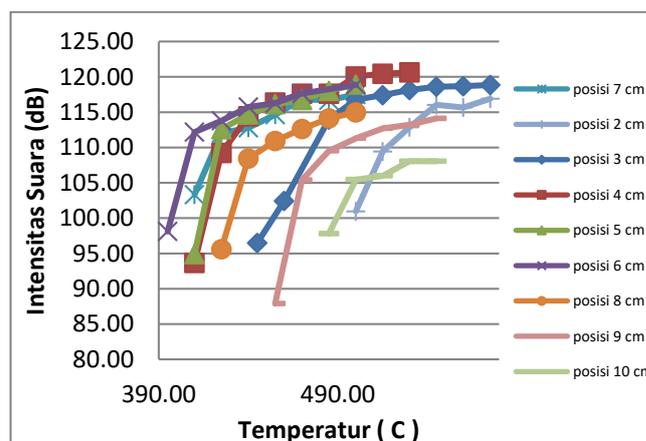
Gambar 3. Skema Umum Termoakustik

Terdapat tiga bagian utama rancangan yaitu area panas, area *stack*, dan area dingin. Ketiga area tersebut terletak pada sebuah tabung yang berfungsi sebagai resonator. Perancangan prototip

ini dilakukan dengan beberapa pertimbangan seperti sifat material, besaran aliran, dan kemudahan mencari komponen yang dibutuhkan.

Hasil dan Analisa

Pada grafik taraf intensitas terhadap onset temperature pada tiap posisi *stack* di bawah terlihat bahwa masing-masing grafik menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu intensitas suara yang bertambah dengan naiknya onset temperatur dan kecenderungan tingginya nilai gradien grafik diawal kenaikan onset temperatur. Pada analisis ini akan diuraikan analisis terjadinya fenomena tersebut. Untuk menjelaskannya, pertama akan dipaparkan mengenai fenomena yang memicu terjadinya daya akustik. Yang mana daya akustik ini terukur pada alat ukur dalam bentuk intensitas suara, sehingga grafik intensitas suara di atas juga merepresentasikan daya akustik yang dihasilkan alat. Telah dijelaskan oleh *Swift et al [1]* bahwa daya akustik pada alat *standing-wave heat engine thermoacoustic* terbentuk karena siklus udara yang mengikuti siklus brayton.



Gambar 4. Grafik Taraf Intensitas Terhadap Onset Temperature Tiap Posisi Stack

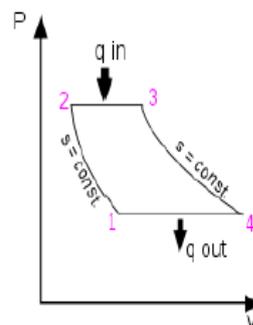
Siklus brayton yang terbentuk pada alat *standing-wave heat engine thermoacoustic* ini, terjadi karena adanya pemanasan pada sisi panas alat, pemanasan ini mengakibatkan udara pada sisi panas alat mengalami pemuaihan dan kenaikan tekanan. Akibatnya paket udara pada sisi panas ini bergerak menuju sisi dingin yang tekannya lebih rendah melalui *stack*. Pada saat bergerak melewati *stack* paket udara yang telah dipanaskan pada sisi panas ini melepaskan sebagian energi panasnya ke *stack* secara konveksi dan konduksi. Akibatnya sepanjang garis *stack* terjadi penyusutan volume paket gas. Proses ini terus berlangsung sampai waktu tertentu. Pada waktu berikutnya tekanan

udara pada sisi panas akan turun hingga sama dengan sisi dingin, hal ini disebabkan karena udara pada sisi panas terus dipompakan ke daerah sisi dingin. Pada tahap ini masih ada aliran udara ke sisi dingin, dikarenakan sisa energi kinetik aliran menjaga aliran tetap berjalan walaupun tekanan antara sisi panas dan dingin telah sama. Sisa energi kinetik aliran ini akan terus mengalirkan udara dari sisi panas ke sisi dingin sampai sisa energi kinetiknya habis, karena udara pada sisi panas terus dialirkan, akibatnya tekanan udara pada sisi panas akan terus menurun sampai di bawah tekanan udara pada sisi dingin. Saat aliran udara berhenti dimana energi kinetik aliran telah habis, tekanan pada sisi panas mencapai nilai minimum. Selanjutnya karena tekanan pada sisi panas lebih rendah dari sisi dingin terjadi aliran dari sisi dingin menuju sisi panas. Pada saat paket udara bergerak dari sisi dingin ke sisi panas dengan melewati stack, terjadi perpindahan energi panas dari stack yang lebih panas ke paket udara yang lebih dingin. Akibatnya volume paket udara akan naik sepanjang garis stack. Proses ini akan berlangsung sampai tekanan pada sisi panas sama dengan pada sisi dingin. Namun sisa energi kinetik aliran udara akan tetap mengalirkan udara ke sisi panas hingga tekanan pada sisi panas terus naik. Aliran udara ini akan berhenti ketika sisa energi kinetik telah habis, dan pada saat ini tekanan udara pada sisi panas mencapai maksimum. Ketika tekanan pada sisi panas maksimum paket udara kembali bergerak dari sisi panas menuju sisi dingin, seperti pada proses awal tadi. Dan proses ini terjadi berulang ulang hingga membentuk siklus.

Alasan terjadinya pola grafik intensitas suara yang cenderung naik dengan kenaikan onset temperatur, dapat dijelaskan dengan proses pelepasan dan penerimaan panas paket gas pada stack. Ketika onset temperatur yang diterapkan rendah, perbedaan temperatur antara paket gas yang bergerak melalui stack dan dinding stack juga rendah, sehingga pada pergerakan paket gas ini akan melepaskan energi panas yang kecil ke stack. Hal ini sesuai dengan persamaan *heat transfer* :

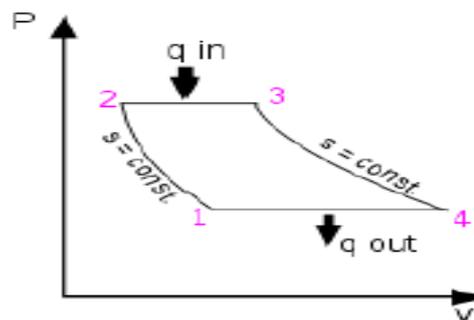
$$Q = m c_p \Delta T \quad (15)$$

Akibatnya luasan pada siklus brayton (yang merepresentasikan besarnya energi suara yang dihasilkan tiap siklus) juga akan kecil.



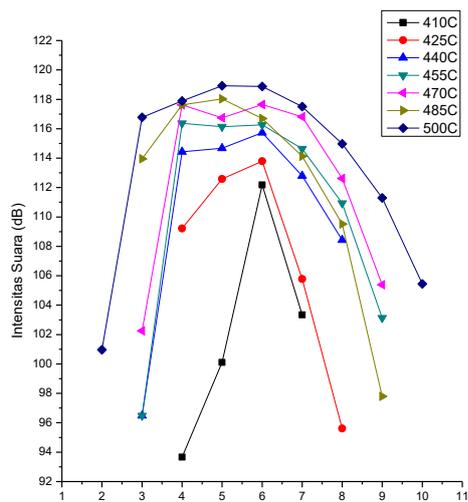
Gambar 4. Ilustrasi Luasan Siklus Brayton Yang Semakin Kecil

Ketika onset temperatur yang diterapkan pada alat *Standing-wave Heat Engine Thermoacoustic* besar maka perbedaan temperatur paket gas dengan stack juga akan besar, sehingga pelepasan energi panas pada stack juga akan besar. Maka luasan pada siklus brayton juga akan semakin besar. Secara grafis panjang 1 ke 4 pada siklus brayton di atas merepresentasikan besarnya pelepasan kalor paket gas ke stack, sedangkan panjang 2 ke 3 merepresentasikan penerimaan kalor paket gas dari stack.



Gambar 5. Ilustrasi Luasan Siklus Brayton Yang Semakin Besar

Dengan semakin besarnya pelepasan kalor paket gas ke stack maka garis 1 ke 4 akan semakin panjang, dan semakin besar penerimaan kalor paket gas dari stack, maka garis 2 ke 3 akan semakin panjang. Yang secara langsung akan membuat luasan tengah grafik lebih besar. Ini cukup menjelaskan mengapa terjadi kecenderungan kenaikan intensitas suara pada kenaikan onset temperatur yang diterapkan. Grafik *Taraf Intensitas Pada Onset Temperatur Gabungan* dibawah menunjukkan kecenderungan intensitas suara yang lebih tinggi pada onset temperatur yang lebih tinggi.



Gambar 6. Grafik Taraf Intensitas Terhadap Posisi Stack Tiap Penerapan Onset Temperature

Sedangkan untuk fenomena dimana gradien grafik pada awal kenaikan temperatur yang cenderung lebih besar daripada kenaikan onset temperatur berikutnya, ini berhubungan dengan efektivitas perpindahan panas paket udara pada stack dan kapasitas panas stack.

Ketika awal pemanasan perpindahan panas paket udara ke stack cenderung kecil karena beda temperatur antara udara pada sisi panas dan stack tidak terlalu besar, dengan kenaikan onset temperatur maka gradien temperatur antara udara sebelum masuk stack dengan sisi stack juga semakin besar. Akibatnya energi panas yang diserap oleh plat stack juga semakin besar, dengan ini maka stack juga akan mengalami kenaikan temperatur, namun pada kondisi ini efektifitas perpindahan panas akan menurun karena sifat material stack yang akan menurun koefisien perpindahan panasnya ketika temperaturnya naik. Selain itu pada kondisi dimana onset temperatur yang diterapkan sangat tinggi, kapasitas panas dari material stack tidak cukup untuk menampung semua energi panas yang ditranfer oleh paket udara dari sisi panas. Akibatnya transfer panas yang besar hanya berlangsung diawal pada waktu yang singkat, pada waktu berikutnya dimana material stack sudah menerima energi panas pada ambang kapasitasnya, transfer panas dari paket udara ke stack akan menurun drastis. Hal inilah yang menyebabkan mengapa kecenderungan gradien grafik terus menurun.

Analisa Berdasarkan Parameter Daya

Pada percobaan ini taraf intensitas suara yang diperoleh sebenarnya merupakan daya yang berbentuk, gelombang ini merambat melalui resonator. Dalam perambatannya gelombang ini menyebar ke segala arah, sehingga daya akustik yang terukur pada alat ukur bukan merupakan daya yang sebenarnya. Maka untuk mengungkapkan secara tepat daya yang diterima suatu alat ukur pada jarak tertentu digunakanlah istilah intensitas yaitu daya per satuan luas.

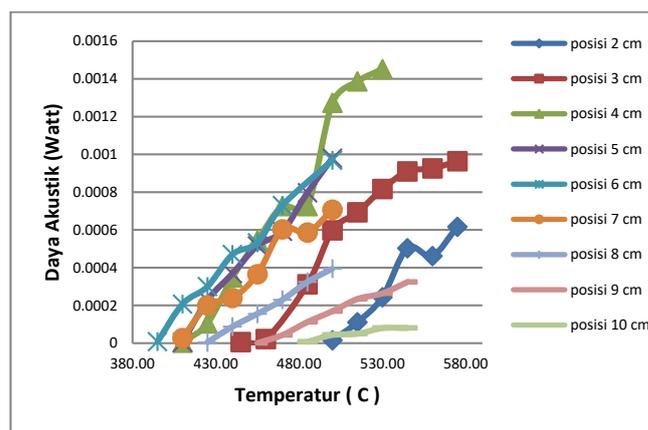
$$E = I \times 4\pi r^2 \tag{16}$$

$4\pi r^2$ pada persamaan di atas digunakan karena sifat rambatan gelombang ke segala arah, sehingga luasannya membentuk selimut bola. Nilai I (watt/m^2) intensitas suara pada persamaan di atas didapat dari persamaan taraf intensitas

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{17}$$

Dimana β taraf intensitas (dB), I intensitas suara (W/m^2), I_0 intensitas ambang suara (10^{-12}W/m^2) dan r adalah jarak pengukuran dengan sumber suara (m).

Dengan menggunakan dua persamaan di atas besarnya daya akustik sebenarnya pada alat *standing-wave heat engine thermoacoustic* direlasikan dengan onset temperatur di tiap posisi stack adalah :



Gambar 8. Grafik Daya Acoustic Terhadap Onset Temperature Tiap Posisi Stack

Jika dilihat dari tren grafik yang terbentuk, semua grafik menunjukkan kecenderungan yang sama. Yaitu adanya kenaikan daya akustik terhadap peningkatan onset temperatur yang diterapkan.

Hal ini sesuai dengan persamaan daya yang diusulkan oleh *Olsen et al* [14].

$$\Delta E_2 = \frac{1}{4\gamma} \delta_{kn} DR^2 \left[BR(\gamma - 1) \cos^2(x_{cn}) \left(\frac{\Gamma}{(1+\sqrt{\sigma})} - 1 \right) - \frac{\sin^2 x_{cn} \sqrt{\sigma}}{BR x_{cn}} \right] \quad (18)$$

Dimana besarnya daya dipengaruhi oleh besar radius resonator(DR), rasio kalor spesifik(γ), panjang panjang stack(L_{sn}), posisi stack (x_{cn}) perbedaan temperatur antara kedua ujung stack (ΔT_n), kedalaman penetrasi termal(δ_{kn}) sesuai dengan jenis gas yang digunakan. Pada persamaan di atas nilai A dan Γ didefinisikan sebagai:

$$A = 1 - \sqrt{\sigma} \delta_{kn} + \frac{1}{2} \sigma \delta_{kn}^2 \quad (19)$$

$$\Gamma = \frac{\Delta T_n}{BR(\gamma-1)L_{sn} \cot(x_{cn})} \quad (20)$$

Dari persamaan 4.4, daya akustik yang dihasilkan dari sistem *standing-wave heat engine thermoacoustic* secara langsung dipengaruhi oleh temperatur gradien (Γ). Dimana temperatur gradien (Γ) ini sebanding dengan temperatur difference (ΔT_n) dan besaran parameter lain persamaan di atas bernilai konstan untuk setiap penerapan posisi *stack*. Dengan kesebandingan nilai (Γ) dan (ΔT_n) maka jika onset temperatur yang diterapkan tinggi maka nilai (Γ) juga akan tinggi, begitu pula sebaliknya. Pada percobaan ini tingginya onset temperatur yang diterapkan secara langsung akan memperbesar nilai (ΔT_n), sehingga secara langsung juga akan memperbesar nilai (Γ). Pada persamaan 4.4 juga ditunjukkan kesebandingan nilai (Γ) dan daya akustik (ΔE_2), sehingga secara silogisme dapat disimpulkan bahwa nilai onset temperatur sebanding dengan nilai daya akustik yang dihasilkan. Dimana hal ini menunjukkan bahwa tren grafik onset temperatur terhadap daya akustik pada percobaan ini telah mengikuti persamaan yang diusulkan oleh *Olsen et al* [14].

Kesimpulan

Berdasarkan pada pengolahan data dan analisa, pengujian sederhana *standing-wave heat engine thermoacoustic* menyimpulkan beberapa hal seperti berikut :

1. Intensitas suara yang dihasilkan pada alat *standing-wave heat engine thermoacoustic*

sebanding dengan onset temperatur yang diterapkan.

2. Nilai gradien grafik intensitas suara terhadap onset temperatur cenderung besar pada awal kenaikan onset temperatur, kemudian nilainya menurun drastis pada kenaikan onset temperatur berikutnya.
3. Tren daya akustik hasil percobaan memiliki kemiripan yang besar dengan persamaan yang diusulkan oleh *Olsen et al* [14].
4. Posisi *stack* dan *onset temperature* yang optimal dalam menghasilkan daya akustik yaitu pada posisi 5 cm dari ujung tabung terbuka dan pada *onset temperature* 500°C.
5. Taraf intensitas suara dan daya akustik terbesar yang dapat dihasilkan pengujian termoakustik ini yaitu pada nilai 118,92 dB dan 9,81x10⁻⁴ Watt.
6. Faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai taraf intensitas dan daya akustik adalah perbedaan suhu yang terjadi pada kedua sisi *stack*, volume udara yang dipanaskan pada sisi panas *stack*, dan periode dari siklus termoakustik.

Referensi

- [1] Swift, GW 2002, *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Acoustical Society of America, Melville NY.
- [2] Hariharan et al. 2012. *Influence of stack geometry and resonator length on performance of thermoacoustic engine*. National Institute Technology.India
- [3] Babaei, Hadi. Siddiqui, Kamran. 2007. *Design and Optimization of Thermoacoustic Devices*. Concordia University. Canada
- [4] Trapp, Andrew c et al. 2011. *Thermoacoustic Heat Engine Modeling and Design Optimization*. Department of Education Graduate Assistance in Areas of National Need. USA
- [5] Hao, X.H at al.2011. *Influence of working fluid on the performance of a standing-wave thermoacoustic prime mover*. Shanghai University. China
- [6] Swift G.W. 1992. *Analysis and performance of a large thermoacoustic engine*. Los Alamos National Laboratory. Mexico

-
- [7] Bisio G, Rubaato. 1998. *Sondhauss and Rijke oscillations—thermodynamic analysis, possible applications and analogies*. University of Genoa. Italy
- [8] Backhauss, S., 2002, *7ew Varietes of Termoakustik Engines*, Thermal Physics group
- [9] Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H., and de Waele, A.T.A.M., 2002b, *Construction and Performance of a Termoakustik Refrigerator*, Cryogenics 42, (Dept of applied physics, Eindhoven University of Technology)
- [10] *Pengembangan sistem pendinginan thermacoustic pada vaccine carrier portabel*, riset unggulan universitas indonesia tahun 2007, Nandy putra
- [11] Sanderson, RD., Offringa, G., McLachlan, DS., Ali, J. 2005. *Membrane Fouling, Visualisation and Infrasonic Cleaning*. Water Research Commission. South Africa.
- [12] Collard, Sophie. 2012. *Design and Assembly of a Thermoacoustic Engine Prototype*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Finland.
- [13] Feng Wu, Chen Lingen, Shu Anqing, Kan Xuxian, Wua Kun, Yang Zhichun. *Constructal design of stack filled with parallel plates in standing-wave thermoacoustic cooler*. Cryogenics 2009;49:107–11.
- [14] Olsen JR, Swift GW. Similitude in thermoacoustics. *J Acoust Soc Am* 1994;95:1405–12.