



Simulasi pemasangan sebuah model kerugian minor perubahan penampang di konektor loop mesin termoakustik

Simulation on the installation of a minor loss model due to gradual cross-sectional changes in the loop of a thermoacoustic engine

N. Nurpatricia*, M. Mirmanto, I.W. Joniarta, Y.A. Padang, I.G.B. Susana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit no. 62, Mataram, NTB, 83125, Indonesia. HP. 085253747819

*E-mail: nurpatricia@unram.ac.id

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 21 February 2023

Accepted 10 March 2023

Available online 01 April 2023

Keywords:

Thermoacoustic engine

Delta EC simulation

Electric power generator

Minor losses



A custom-designed thermoacoustic engine model has been created with the open source Delta EC simulation software. The specific design of the engine lies in the part of the heat exchanger, which allows it to receive heat from the hot gas stream resulting from the combustion of low grade biomass directly. The engine model can be coupled with a loudspeaker model that functions as a liner alternator, resulting in a simple power generator engine model. In this study, further simulations were carried out to increase the total efficiency of converting heat energy into electricity from the previous model. After that a model of minor loss of cross-sectional change was also added to the model. In a certain set of engine model parameter values without minor losses, the efficiency of converting heat energy to acoustic energy is 12.76%, equivalent to the amplification of acoustic energy by a regenerator of 33.26 W. The total efficiency of the engine model in converting heat energy into electrical energy is 10.53%. After the addition of a sub-program of minor losses due to the effect of one conical segment, there was an acoustic energy loss of 0.11 W. So that the efficiency of converting heat energy to acoustic energy was reduced by 0.01% to 12.75%. As a result, relatively small change occur in the total efficiency of the engine model.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 13, No. 1, April 2023, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir telah berkembang jenis teknologi mesin pembakaran luar yang relatif baru, yaitu mesin termoakustik. Secara desain, mesin termoakustik berkomponen sedikit dengan konstruksi sederhana. Melalui perencanaan yang tepat mesin ini dapat dibuat agar mampu memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakarnya. Terlebih lagi jika biomassa tersebut tersedia melimpah dalam bentuk limbah pertanian seperti di pedesaan. Potensi energi biomassa di Indonesia relatif besar, setara 32654 MWe. Dari jumlah tersebut tidak lebih dari 5% yang sudah dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar dalam sistem pembangkitan energi listrik, baik

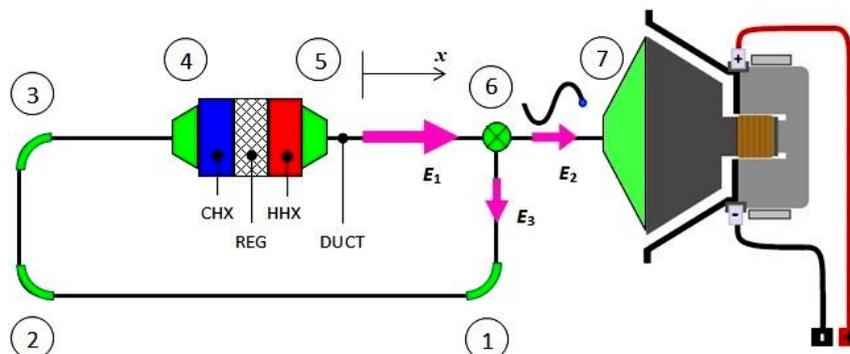
off-grid maupun *on-grid*, Yudiartono (2018). Data tersebut menunjukkan masih terbuka kesempatan prospektif bagi implementasi teknologi mesin termoakustik, karena mesin ini dapat menggunakan biomassa sebagai sumber bahan bakarnya, bahkan yang berjenis grade rendah.

Mengacu metode desain Yu dkk. (2012) dan Piccolo (2018), Nurpatricia dkk. (2019) telah memulai simulasi untuk membangun model mesin termoakustik. Model mesin termoakustik awal tersebut bekerja dengan efisiensi proses konversi energi kalor menjadi energi akustik relatif rendah, yaitu 3,31%. Kemudian, Nurpatricia dkk. (2020) dapat menaikkan efisiensi model menjadi 7,16 % dengan simulasi lanjutan. Termutakhir, Nurpatricia dkk. (2021) berhasil membuat model yang berefisiensi 11,47%, dimana model ini telah dapat dikopel dengan loudspeaker agar mampu membangkitkan listrik. Efisiensi konversi energi kalor menjadi listrik model terakhir adalah 9,46%. Kopel teknis loudspeaker dengan mesin mengikuti Abdoulla dkk. (2017) dan Piccolo (2018). Selain itu, metode perhitungan konversi kalor menjadi listrik, mengikuti prosedur perhitungan Hamooh dkk (2019), Chen dkk. (2015), dan Timer dkk. (2018) dengan memfungsikan loudspeaker sebagai alternator linier.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pemodelan mesin

Skema model mesin yang dibangun dalam simulasi ini seperti pada gambar 1. Metode kopel yang dipakai adalah menempatkan loudspeaker di dalam loop mesin, berimpit dengan aliran bolak balik fluida kerja dalam arah sumbu x , Yu dkk. (2012). Energi akustik dibangkitkan oleh *regenerator* (REG), dengan adanya gradien temperatur di kedua sisinya. Gradien temperatur fluida kerja dimungkinkan dengan adanya manipulasi suplai kalor antara *cold heat exchanger* (CHX) dan *hot heat exchanger* (HHX). Energi akustik E_1 hasil amplifikasi REG, terbagi di titik percabangan menjadi E_2 dan E_3 . Energi E_3 mengalir kembali dalam loop dan menjadi energi umpan yang kembali masuk CHX untuk di-amplifikasi lagi oleh REG, dan selanjutnya kembali ke HHX. Sebagian energi E_1 mengalir ke loudspeaker sebesar E_2 yang besarnya tergantung berbagai faktor, Chen dkk. (2015), Abdoulla dkk. (2017). Dalam proses simulasi, nilai parameter terbatas diantaranya karena *loudspeaker* memiliki batas kejenuhan fisis menurut parameter TSP, yaitu dalam konversi energi akustik menjadi energi listrik, Hamood dkk. (2019). Faktor lain yang juga berpengaruh adalah pemilihan dimensi fisis loudspeaker, lokasi percabangan relatif terhadap regenerator, panjang saluran dari titik percabangan ke loudspeaker, dan besarnya beban resistor pada terminal keluaran listrik di loudspeaker, Elferink dkk. (2019), Thatea (2012).



Gambar 1. Skema mesin termoakustik sebagai pembangkit listrik

2.2 Pemodelan Efisiensi

Pernyataan pembangkitan energi akustik oleh regenerator dinyatakan suku ruas kiri persamaan (1), yaitu bagian *real* (Re) variabel kompleks gelombang tekanan p_1 , laju aliran volume U_1 , dan faktor gain kompleks g . Suplai kalor Q_h dimasukkan ke HHX agar tercipta gradien temperatur (dT_m/dx) terhadap temperatur sink yang terjaga konstan oleh CHX. Kontribusi *penetration depth* δ_k dalam persamaan tersebut ada pada suku kompleks $\text{Re}[f_k]$. Dengan pengaturan dimensi δ_k yang tepat, suku $\text{Re}[f_k]$ dapat bernilai maksimum. Amplifikasi energi akustik E_l ruas kiri persamaan (1) dikurangi disipasi regenerator sesuai persamaan Swift (2001).

$$\frac{1}{2} \text{Re}[gU_1\tilde{p}_1] = \frac{1}{2} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \text{Re}[\tilde{p}_1U_1] \text{Re}[f_k] + \frac{1}{2} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \text{Im}[\tilde{p}_1U_1] \text{Im}[-f_k] \quad (1)$$

Energi akustik mesin E_l tersebut adalah hasil amplifikasi, yaitu beda antara daya akustik yang keluar REG (E_{lo}) terhadap daya akustik umpan loop ke dalam REG (E_{li}). Sehingga E_1 pada gambar 1 adalah, $E_1 = E_{lo} - E_{li}$. jika kerugian diabaikan. Dengan demikian efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik (η_H) yang ditunjukkan dalam hasil simulasi adalah,

$$\eta_H = (E_1 / Q_h) \quad (2)$$

Saat tuning parameter untuk kopling loop dengan loudspeaker berhasil dilakukan, sejumlah energi akustik E_2 akan mengalir ke loudspeaker, sehingga tekanan p_1 dan laju aliran volume U akan menginduksi gerakan translasi koil loudspeaker, dimana hal ini kebalikan dari keadaan operasi normal laoudspeaker dimana daya listrik akan menginduksi getaran membran untuk mentransfer energi menjadi gelombang akustik.

$$\eta = (\eta_H \eta_E) \quad (3)$$

Dengan konversi energi laoudspeaker η_E , efisiensi total mesin dinyatakan dengan persamaan (3). Simulasi dilakukan dengan software open source Delta EC Versi 6.2, dari Ward dkk. 2008.

2.3 Pemodelan Kerugian

Saluran yang membentuk loop mesin pada gambar 1 dalam model mesin dari Nurpatricia dkk. (2021), terpasang dengan asumsi terbuat dari saluran tanpa belokan dan tanpa perubahan diameter. Konstruksi saluran seperti itu relative mahal dan sulit untuk dibangun secara real, walaupun memungkinkan secara desain. Dalam manufaktur komponen mesin, saluran tersebut biasanya terbuat dari pipa yang disambung dengan konektor. Sebagai konsekuensinya, model tersebut harus dikoreksi agar dapat merepresentasikan berbagai geometri fisis saluran real tersebut, termasuk *flow losses*, atau kerugian aliran, yang terjadi di belokan dan perubahan diameter. Kerugian aliran pada kasus belokan dan perubahan diameter tersebut dikenal secara umum sebagai kerugian minor. Pernyataan kerugian minor (Δp) dalam saluran mesin termoakustik sesuai dengan Ward dkk. (2008), nilainya tergantung koefisien K , dan kecepatan aliran u yang diturunkan dari laju aliran volumetrik dalam pernyataan kompleks U_1 pada persamaan (1).

Potensi kerugian minor yang belum mampu diperhitungkan dalam hasil simulasi model mesin Nurpatricia dkk. (2011), adalah di lokasi tertentu seperti ditunjukkan gambar 1.

$$\Delta p = -\frac{1}{2} K u^2 \quad (4)$$

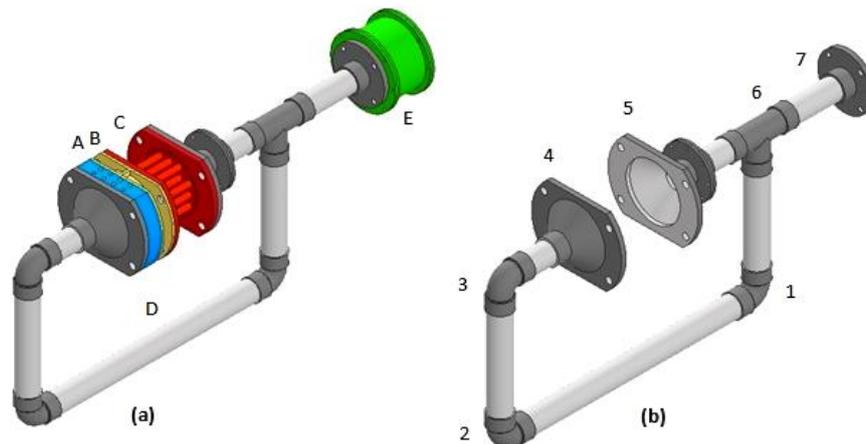
Secara aktual, kerugian minor dapat timbul dari belokan pipa 1, 2, dan 3. Selain itu, kerugian minor juga bisa timbul dari perubahan penampang saluran 4, 5, dan 7. Percabangan pipa 6 juga menjadi sumber kerugian minor. Dalam makalah ini ditunjukkan perbandingan antara hasil simulasi model mesin dengan tidak ada kerugian minor (model ideal, dalam tabel 1), dengan hasil simulasi model yang sudah ditambahkan kerugian minor 5 (model km-5, dalam tabel 1), yaitu kerugian karena efek gabungan *gradual contraction* dan *gradual enlargement*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2(a) adalah gambar CAD 3D tanpa skala model mesin hasil simulasi Delta EC. Loop mesin (D) terbentuk dari saluran DUCT. Loudspeaker (E) terhubung dengan sebuah segmen duct berbentuk pipa. Segmen A, B, dan C berturut-turut adalah komponen CHX, REG, dan HHX di skema gambar 1. Gambar 2(b) adalah detail DUCT yang sudah terhubung dengan berbagai macam sambungan yang sesuai. Terlihat segmen belokan 90° di 1, 2, dan 3. Perubahan penampang di 4, 5, dan 7. Segmen 6 adalah percabangan. Segmen 5 menunjukkan geometri berbentuk konis sebagai sumber kerugian minor, yang memberikan efek obstruksi terhadap aliran.

Parameter mesin hasil simulasi lanjutan penelitian tahun 2022 dirangkum di tabel 1. Simulasi telah berhasil menemukan setting nilai parameter geometri baru pada Regenerator, HHX, dan CHX, sehingga efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik model mesin terkini mencapai 12,76%, dan ini lebih tinggi 1,29% dari efisiensi model sebelumnya 11,47% (Nurpatricia dkk., 2021). Perubahan terjadi pada geometri regenerator, penampang disesuaikan dari 950 mm² menjadi 960 mm², dan radius hidrolik lebih kecil dari 0,020 mm menjadi 0,0196 mm. Konstruksi regenerator tetap terbuat dari *wire mesh screen* dengan detail konstruksi seperti dalam Yu dkk. (2012) dan Hamood dkk. (2019). Ketebalan tumpukan material *wire mesh* kedua model tetap sama, 28 mm.

Energi akustik yang dibangkitkan regenerator adalah nilai netto, dan ini merupakan hasil amplifikasi dari aliran energi akustik yang masuk regenerator. Energi akustik sesaat sebelum masuk regenerator adalah 52,854 W. Energi ini dianggap sama dengan energi akustik keluar dari CHX, dengan asumsi tidak ada kerugian minor di celah interface CHX, REG, dan HHX karena ketiganya disetting secara geometri agar mempunyai diameter sama. Keluar dari REG, energi akustik telah diperbesar menjadi 86,113 W. Karena itu, amplifikasi netto energi akustik total mesin adalah 33,26 W.



Gambar 2. CAD komponen mesin, semua dimensi tanpa skala tetapi proporsional, (a) komponen utama, (b) lokasi terjadinya kerugian minor dalam pemodelan mesin.

Tabel 1. Parameter mesin hasil simulasi model ideal, dibandingkan dengan model km-5

Komponen Mesin	Parameter		Model ideal	Model km_5
	Nama	Simbol Satuan		
Parameter Global	Energi akustik netto	E_1 W	33,26	33,15
	Efisiensi Kalor - Akustik	η_H %	12,76	12,75
	Efisiensi Akustik - Listrik	η_E %	82,54	82,54
	Efisiensi Kalor - Listrik	η %	10,53	10,53
	Driving Force	(p/p_m) %	8,7	8,7
	Frekwensi	f Hz	82	82
Regenerator	Panjang loop mesin	L cm	364	364
	Panjang	L mm	28	28
	Area	A mm ²	960	960
	Porositas	Vol %	82	82
HHX	Radius hidrolik	r_h mm	0,0196	0,0196
	Panjang	L mm	172	172
	Area	A mm ²	960	960
	Porositas	Vol %	20	20
CHX	Kalor input	Q_{in} W	260	260
	Temperatur	T_H K	800	800
	Panjang	L mm	6	6
	Area	A mm ²	960	960
	Porositas	Vol %	6	6
	Kalor keluar	Q_{out} W	210	210
	Temperatur	T_C K	296	296

Konstruksi geometri HHX dan CHX juga mengalami sedikit perubahan, yaitu pada panjang L , dan area A . HHX menjadi lebih panjang sekitar 12 mm, dari sebelumnya 160 mm. Sedangkan luas area nya lebih besar 10 mm², menjadi 960 mm². Masukan kalor HHX tetap sama, 260 W. Trend yang sama juga terjadi pada CHX, mengalami sedikit perubahan desain.

Perhitungan kerugian minor yang terjadi menurut persamaan (4), memerlukan referensi nilai K dan u . Nilai kecepatan u dapat langsung dikenali oleh program di dalam model, yang tergantung dari laju aliran volume U di lokasi setempat. Nilai K , akan berbeda tergantung arah. Aliran searah dengan x pada gambar 1, akan dikenali sebagai $K(+)$ sedangkan dalam arah sebaliknya dikenali sebagai $K(-)$, sehingga nilai K tergantung arah aliran. Dalam arah x , konis menjadi obstruksi bersifat *gradual contraction*, sedangkan dalam arah berlawanan dengan x , konis tersebut berubah sifat menjadi *gradual enlargement*, Ward dkk. (2008). Perhitungan yang menggunakan dua jenis nilai K secara simultan ini, terkait dengan karakteristik aliran fluida kerja di dalam mesin termoaustik yang bergerak bolak balik pada suatu rentang osilasi tertentu, yang dikenal sebagai panjang karakteristik, Swift (2001). Dalam pemodelan kerugian minor diambil nilai $K(+)$ = 0,10, dan $K(-)$ = 0,50, Ward dkk. (2008). Pada setting tersebut, *losses* energi akustik E_1 yang terjadi pada konis segmen 5 adalah 0,11 W.

Kerugian minor yang terjadi di cabang ke arah loudspeaker belum dimodelkan, sehingga efisiensi konversi energi akustik menjadi energi listrik untuk model ideal dan model km_5 adalah sama, yaitu 82,54%. Karena efek *losses* dari satu segmen belokan relatif kecil, efisiensi total kedua model, model ideal dan model km_5, menjadi relatif sama 10,53%.

4. KESIMPULAN

Model mesin termoakustik yang dikopel dengan loudspeaker tetap dapat bekerja dengan baik, bahkan melalui proses simulasi lanjutan, efisiensi model telah dapat dinaikkan dari 11,47% menjadi 12,76%. Tahapan terakhir dari simulasi lanjutan dengan memasukkan efek kerugian minor, menyebabkan energi akustik berguna berkurang 0,11 W, atau setara dengan perubahan efisiensi menjadi 12,75%. Efisiensi total model dalam konversi energi kalor menjadi listrik relatif tetap pada 10,53% karena kecilnya kontribusi efek kerugian minor sebuah komponen konis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Disampaikan terima kasih atas pendanaan penelitian dari Universitas Mataram melalui LPPM Universitas Mataram dengan skema Penelitian PNPB Universitas Mataram No.1625/UN18.L1/PP/2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdoulla-Latiwish, K.O.A., Mao, X., Jaworski, A.J., Thermoacoustic micro-electricity generator for rural dwellings in developing countries driven by waste heat from cooking activities, *Jurnal Energy* 134, 1107-1120, 2017.
- Chen, B.M., Jiang, R.H., Investigation of the use of loudspeaker as a liner alternator for thermoacoustic application, *Prosiding CISIA 2015*, 2015.
- Elferink, M., Steiner, T., Thermoacoustic waste heat recovery engine: comparison of simulation and experiment, *Prosiding Meetings on Acoustics*, 35(065002), 2018.
- Hamood, A., Jaworski, A., Experimental investigations of the performance of a thermoacoustic electricity generator, *Prosiding ASEE19 E3S Web of Conferences*, 116(00025), 2019.
- Nurpatricia, Syahrul, Pandiatmi, P., Sayoga, I.M.A, Mulyanto, A., Penentuan efisiensi konversi energi mesin termoakustik dengan simulasi parameter regenerator, *Prosiding SAINTEK 2019 LPPM UNRAM*, 2019.
- Nurpatricia, Susana, I.G.B, Joniarta, I.W., Nurchayati, Tira, H.S., Peningkatan efisiensi mesin termoakustik, *Prosiding SAINTEK 2020 LPPM UNRAM*, 2020.
- Nurpatricia, Mirmanto, Rachmanto, T., Sayoga, I.M.A., Susana, I.G.B, Simulasi kopling loudspeaker sebagai alternator linier di mesin termoakustik berbahan bakar biomassa, *Prosiding SAINTEK 2021 LPPM UNRAM*, 2021.
- Piccolo, A., Study of standing-wave thermoacoustic electricity generators for low-power applications, *Jurnal Applied Science* 8(287), 2018.
- Swift, G.W., *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Fifth Draft, Penerbit Los Alamos USA, 2001.
- THATEA, *Thermoacoustic technology for energy applications*, Penerbit ECN Netherlands, 2012.
- Timmer, M.A.G., de Blok, K, Meer, T.H., Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity, *Jurnal Acoustic Society of America*, 143(2), 2018.
- Ward, B., Clark, J., Swift, G.W., *Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DELTA-EC) Version 6.2*, Penerbit Los Alamos USA, 2008.
- Yu, Z., Jaworski, A.J., Backhaus, S., A low-cost electricity generator for rural areas using a travelling-wave looped-tube thermoacoustic engine, *Jurnal Power and Energy*, 224(6), 787 - 795, 2012.
- Yudiantono, *Outlook Energi Indonesia 2018*, Penerbit BPPT Indonesia, 2018.