

SIMULASI PEMASANGAN MODEL KERUGIAN MINOR PERUBAHAN PENAMPANG DI MESIN TERMOAKUSTIK

Nurpatria*, Mirmanto, I W Joniarta, Yesung A Padang, I G Bawa Susana
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

*Corresponding Author Email: nurpatria@unram.ac.id

ABSTRAK.

Sebuah model mesin termoakustik berdesain khusus telah dibuat dengan software *open source* simulasi Delta EC. Kekhususan desain mesin ada pada bagian alat penukar kalor, sehingga memungkinkannya menerima kalor dari aliran gas panas hasil pembakaran biomassa bergrade rendah secara langsung. Model mesin telah dapat dikopel dengan model loudspeaker yang difungsikan sebagai alternator linier, sehingga dihasilkan model mesin pembangkit listrik sederhana. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi lanjutan untuk meningkatkan efisiensi total konversi energi kalor menjadi listrik model sebelumnya. Setelah itu sebuah model kerugian minor perubahan penampang juga ditambahkan pada model. Pada suatu set nilai parameter model mesin tertentu tanpa kerugian minor, efisiensi konversi energi kalor ke energi akustik adalah 12,76%, setara dengan amplifikasi energi akustik oleh regenerator sebesar 33,26 W. Efisiensi total model mesin pada konversi energi kalor menjadi energi listrik adalah 10,53%. Setelah penambahan sub-program kerugian minor karena efek satu segmen konis, terjadi *losses* energi akustik sebesar 0,11 W. Sehingga efisiensi konversi energi kalor ke energi akustik berkurang 0,01% menjadi 12,75%. Sebagai efeknya, perubahan efisiensi total model mesin relatif kecil.

Keyword: mesin termoakustik, simulasi Delta EC, pembangkit listrik, kerugian minor

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.

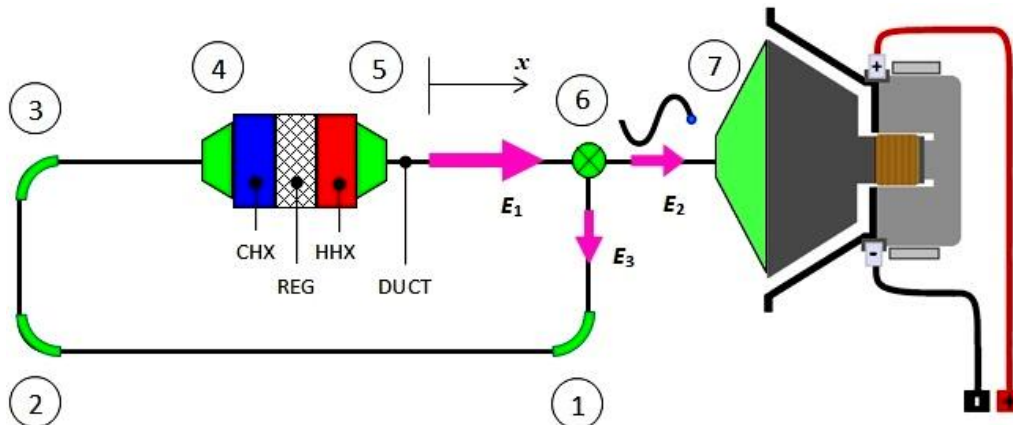
Mengacu metode desain Yu *et al* (2012) dan Piccolo (2018), Nurpatria dkk (2019) telah memulai simulasi untuk membangun model mesin termoakustik. Model mesin termoakustik awal tersebut bekerja dengan efisiensi proses konversi energi kalor menjadi energi akustik relatif rendah, yaitu 3,31%. Kemudian, Nurpatria dkk (2020) dapat menaikkan efisiensi model menjadi 7,16 % dengan simulasi lanjutan. Termutakhir, Nurpatria 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 *et al*

(2017) dan Piccolo (2018). Selain itu, metode perhitungan konversi kalor menjadi listrik, mengikuti prosedur perhitungan Hamooh *et al* (2019), Chen *et al* (2015), dan Timer *et al* (2018) dengan memfungsikan loudspeaker sebagai alternator linier.

2. METODE

Pemodelan Mesin

Skema model mesin yang akan dibangun dalam penelitian ini seperti pada Gambar 1. Metode kopel yang dipakai adalah menempatkan loudspeaker di dalam loop mesin, berimpit dengan aliran bolak balik fluida kerja dalam sumbu x , Yu *et al* (2012).



Gambar 1. Skema mesin termoakustik pembangkit listrik

Energi akustik dibangkitkan oleh *Regenerator* (REG), dengan adanya gradien temperatur di kedua sisinya. Gradien temperatur fluida kerja dimungkinkan dengan manipulasi suplai kalor *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 *et al* (2015), Abdoulla *et al* (2017). Dalam proses simulasi, nilai parameter terbatas karena loudspeaker memiliki batas kejenuhan fisis menurut parameter TSP, dalam konversi energi akustik menjadi energi listrik, Hamood *et al* (2019). Faktor lain yang juga berpengaruh adalah pemilihan dimensi fisis loudspeaker, lokasi percabangan relatif terhadap regenerator, panjang saluran penghubung dari titik percabangan ke loudspeaker, dan besarnya beban resistor pada terminal keluaran listrik di loudspeaker, Elferink *et al* (2019), THATEA (2012).

Pemodelan Efisiensi

Pernyataan pembangkitan energi akustik oleh regenerator dinyatakan suku ruas kiri Pers.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_1 ruas kiri Pers.1 dikurangi disipasi regenerator sesuai persamaan Swift (2001).

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

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 yang ditunjukkan dalam hasil simulasi adalah,

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

Jika tuning parameter untuk meng-kopling loop dengan loudspeaker berhasil dilakukan, maka sejumlah energi akustik E_2 akan mengalir ke loudspeaker, sehingga tekanan p_1 dan laju aliran volume U akan menginduksi gerakan translasi koil loudspeaker, kebalikan yang terjadi pada 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 Pers.3. Simulasi dilakukan dengan software open source Delta EC Versi 6.2, dari Ward *et al*, 2008.

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. Hal tersebut mahal dan sulit untuk dibangun secara real, dan hal itu praktis secara desain. Dalam manufaktur komponen mesin, saluran tersebut biasanya dibuat dari pipa yang disambung dengan konektor. Sebagai konsekwensinya, model tersebut harus dikoreksi agar mampu merepresentasikan berbagai geometri fisis saluran 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 koefisiesn K , dan kecepatan aliran u yang diturunkan dari laju aliran volumetrik dalam pernyataan kompleks U_1 pada Pers.1. Potensi kerugian minor yang belum mampu diperhitungkan dalam hasil simulasi model mesin Nurpatricia dkk (2011) adalah di lokasi tertentu seperti ditunjukkan Gambar 1.

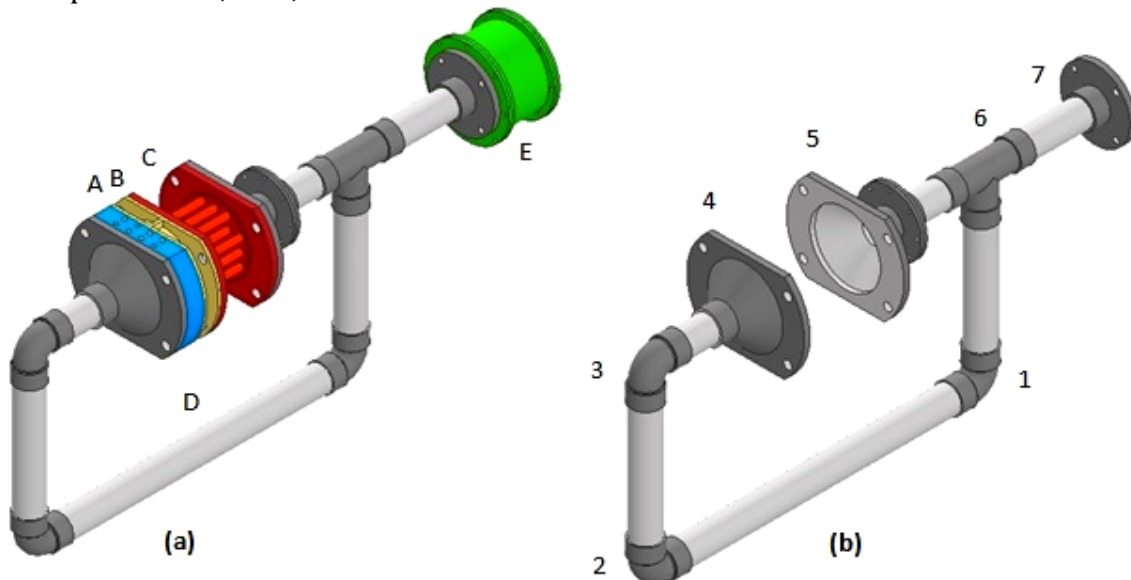
$$\Delta p = -\frac{1}{2} Ku^2 \quad (4)$$

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 sumber kerugian minor. Dalam makalah ini ditunjukkan rangkuman hasil simulasi model mesin dengan tidak ada kerugian minor (model ideal, dalam Tabel 1), dibandingkan dengan hasil simulasi model yang ditambahkan kerugian minor 5 (model km-5, dalam Tabel 1), yaitu kerugian karena efek gabungan *gradual contraction* dan *gradual enlargement*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Desain

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

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.

Karakteristik Mesin

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% (Nurpatria dkk, 2021). Perubahan terjadi pada geometri regenerator, penampang disesuaikan dari 950 mm² menjadi 960 mm², dan radius hidrolis lebih kecil dari 0,020 mm menjadi 0,0196 mm. Konstruksi regenerator tetap terbuat dari *wire mesh screen* dengan detail konstruksi seperti dalam Yu *et al* (2012) dan Hamood *et al* (2019). Ketebalan tumpukan material *wire mesh* kedua model tetap sama, 28 mm.

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
	Panjang loop mesin	L	cm	364	364
Regenerator	Panjang	L	mm	28	28
	Area	A	mm ²	960	960
	Porositas	Vol	%	82	82
	Radius hidrolik	r_h	mm	0,0196	0,0196
HHX	Panjang	L	mm	172	172
	Area	A	mm ²	960	960
	Porositas	Vol	%	20	20
	Kalor input	Q_{in}	W	260	260
	Temperatur	T_H	K	800	800
CHX	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

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.

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.

Kerugian Minor

Perhitungan kerugian minor yang terjadi menurut Pers.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 termoakustik 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 terdahulu dari Nurpatricia dkk (2021) 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 terkini dalam konversi energi kalor menjadi listrik relatif tetap pada 10,53% karena kecilnya kontribusi efek kerugian minor dari satu komponen konis.

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

5. DAFTAR REFERENSI

1. Abdoulla-Latiwish, K.O.A., Mao, X., Jaworski, A.J., 2017, "Thermoacoustic micro-electricity generator for rural dwellings in developing countries driven by waste heat from cooking activities", *Energy* 134, pp.1107-1120
2. Chen, B.M., Jiang, R.H., 2015, "Investigation of the Use of Loudspeaker as a Liner Alternator for Thermoacoustic Application", CISIA 2015, DOI: 10.2991/cisia-15.2015.60
3. Elferink, M., Steiner, T., 2019, "Thermoacoustic waste heat recovery engine: Comparison of simulation and experiment", *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 35, 065002 (2019), DOI:10.1121/2.0000978
4. Hamood, A., Jaworski, A., 2019, "Experimental investigations of the performance of a thermoacoustic electricity generator", *ASEE19, E3S Web of Conferences* 116, 00025 (2019)
5. Nurpatricia, Syahrul, Pandiatmi, P., Sayoga, I.M.A., Mulyanto, A., 2019, "Penentuan efisiensi konversi energi mesin termoakustik dengan simulasi parameter regenerator", *Prosiding SAINTEK 2019 LPPM UNRAM*
6. Nurpatricia, Susana, I.G.B., Joniarta, I.W., Nurchayati, Tira, H.S., 2020, "Peningkatan efisiensi mesin termoakustik", *Prosiding SAINTEK 2020 LPPM UNRAM*
7. Nurpatricia, Mirmanto, Tri Rachmanto, Sayoga, I.M.A., Susana, I.G.B., 2021, "Simulasi kopling loudspeaker sebagai alternator linier di mesin termoakustik berbahan bakar biomassa", *Prosiding SAINTEK 2021 LPPM UNRAM*
8. Piccolo, A., 2018, "Study of Standing-Wave Thermoacoustic Electricity Generators for Low-Power Applications", *Appl. Sci.* (2018) 8, 287, DOI:10.3390/app8020287
9. Swift, G.W., 2001, *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Fifth Draft, Los Alamos USA
10. THATEA, 2012, *Thermoacoustic Technology for Energy Applications*, ECN Netherlands
11. Timmer, M.A.G., de Blok, K., Meer, T.H., 2018, "Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity", *J. Acoust. Soc. Am.* 143 (2), February 2018
12. Ward, B., Clark, J., Swift, G.W., 2008, *Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion (DELTA-EC) Version 6.2*, Los Alamos USA
13. Yu, Z., Jaworski, A.J., Backhaus, S., 2012, "A low-cost electricity generator for rural areas using a travelling-wave looped-tube thermoacoustic engine", DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09576509JPE864>
14. Yudiartono, 2018, "Outlook Energi Indonesia 2018", BPPT Indonesia