



Simulasi karakteristik mesin termoakustik pembangkit listrik dengan penambahan model kerugian minor dari dua segmen konis

Simulation of an electric generator thermoacoustic engine attached with minor losses model induced by two conical segments

N. Nurpatricia*, M. Mirmanto, Y.A. Padang, N. Nurchayati

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 31 May 2024

Accepted 26 July 2024

Available online 01 October 2024

Keywords:

Thermoacoustic engine

Delta EC simulation



Acoustic energy output level from regenerator segment of a thermoacoustic engine model is attenuated along its loop due to several conditions including minor losses. This article discusses the result of Delta EC simulation of a thermoacoustic engine model acting as simple electric power generator that inserted with two conical segments. The cone segments are capable to lower the energy loss which in turn improve the overall performance of the engine in term of nett heat to acoustic energy conversion efficiency. Combined acoustic energy loss induced by both cones is equivalent to 4.94 watts minor losses. At this condition, regenerator segment amplifies the incoming acoustic energy flow of 57.02 watt up to 93.57 watt, which is equals to 36.55 watts acoustic amplification. It leads to increasing of overall engines heat to acoustic efficiency into 14.05%, which is 1.29% higher than those at the case of without cones. This engine performance improvement addressed to smoother streamline of working fluid flow inside the loop.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 14, No. 2, Oktober 2024, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

Salah satu faktor yang dianggap sebagai kontributor utama dalam perubahan iklim global adalah pemakaian bahan bakar fosil yang semakin banyak. Hal ini merupakan salah satu tantangan kemanusiaan yang memunculkan kesadaran kolektif untuk mulai mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang masih menjadi tumpuan utama pemenuhan energi global, yang mencapai 81% menurut World Bioenergy Association, Suharyati dkk. (2018). Penggunaan bahan bakar fosil ini dianggap sebagai pendorong utama perubahan iklim terbesar dengan emisi gas rumah kaca. Dewasa ini giat dilakukan perubahan pola konsumsi bahan bakar fosil yang digantikan dengan sumber energi terbarukan seperti biomassa. Selain sebagai bahan bakar rumah tangga yang umum di negara agraris, sebenarnya biomassa juga dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin pembakaran dalam dan mesin pembakaran luar. Agar dapat digunakan pada mesin pembakaran dalam, biomassa perlu dimurnikan terlebih dahulu agar menjadi jenis bahan bakar ber-grade tinggi. Ketersediaan teknologi yang dibutuhkan untuk mengolah biomassa menjadi jenis bahan bakar bermutu tinggi untuk skala kecil, misalnya

untuk kebutuhan rumah tangga di pedesaan, masih terbatas. Keterbatasan ini terutama disebabkan oleh kebutuhan peralatan pendukung dalam proses yang masih cukup kompleks, serta biaya pemasangan awal yang masih relatif mahal. Kedua faktor tersebut antara lain pembatasan penggunaan bahan bakar biomassa untuk mesin pembakaran dalam. Oleh karena itu, biomassa sebagai bahan bakar mesin lebih umum dipakai di jenis mesin pembakaran luar (Suharyati dkk., 2018).

Di sisi lain, teknologi mesin termoaustik sebagai salah satu jenis pembakaran luar telah muncul dalam beberapa dekade terakhir. Keunikan mesin jenis ini adalah tidak memiliki bagian yang bergerak. Semua komponen utama mesin ditempatkan di saluran utama yang membentuk loop, satu lingkaran penuh. Selain itu, mesin dapat juga dirancang untuk memanfaatkan sumber panas dari berbagai jenis, termasuk panas dari pembakaran biomassa tanpa perlakuan yang dikategorikan sebagai sumber energi tingkat rendah. Energi panas dari sumber energi tingkat rendah kemudian diubah menjadi energi akustik dalam komponen mesin termoaustik dari bahan berpori yang disebut regenerator. Energi akustik yang dihasilkan oleh mesin termoaustik selanjutnya dapat diubah menjadi energi mekanik, dengan cara mengekstraksi amplitudo tekanan dari gelombang akustik, Gaikwad dkk. (2024).

Sebuah model awal mesin termoaustik telah dibangun Nurpatricia dkk (2019), dirancang untuk dapat memanfaatkan hasil pembakaran bahan bakar biomassa sebagai sumber panas sebagaimana deskripsi umum dalam Chen dkk. (2021). Dari model tersebut, model mesin telah dikembangkan secara bertahap sehingga menjadi model yang dipresentasikan dalam artikel ini (Nurpatricia dkk., 2020; Nurpatricia dkk., 2021; Nurpatricia dkk., 2023). Model mesin terakhir memiliki parameter yang mengacu pada dua setup konstruksi, konstruksi mesin Yazaki serta konstruksi mesin Backhaust dan Swift, seperti deskripsi dalam Chen dkk. (2021). Kekhususan desain model awal ada pada susunan *hot heat exchanger* yang memungkinkannya menerima panas dari aliran gas buang secara langsung dari pembakaran biomassa kualitas rendah. Penerapan tipikal mesin dalam skala kecil adalah di daerah pedesaan, mengingat ketersediaan biomassa grade rendah yang melimpah seperti limbah pertanian di lokasi tersebut. Loop mesin tersebut dimodelkan sebagai saluran kontinu tanpa ada belokan atau perubahan luas saluran. Akibatnya, fluida kerja di dalam loop dianggap mengalir tanpa mengalami kehilangan energi apapun. Perilaku idealisasi ini tidak cocok dengan fakta bahwa aliran aktual mengalami kehilangan energi karena gesekan permukaan atau penurunan tekanan. Tujuan utama dari makalah ini adalah untuk mempresentasikan hasil simulasi perbaikan yang memperhitungkan kehilangan energi akustik yang disebabkan penambahan model dua kerugian aliran, yaitu kerugian minor dua segmen konis yang ditempatkan pada dua lokasi berbeda dengan orientasi konis berlawanan. Dengan adanya penambahan model kerugian minor tersebut, overdimensi atau underdimensi pada geometri desain tiap komponen mesin dapat dikompensasi.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pemodelan mesin

Skema model mesin dalam artikel ini seperti pada gambar 1. Metode kopel yang dipakai adalah menempatkan loudspeaker di suatu lokasi di luar loop mesin dengan percabangan sehingga fluida kerja mengalir bolak balik sepanjang loop dalam arah sumbu x , McGaughy dkk. (2021). Energi akustik dibangkitkan di dalam segmen *regenerator* (REG), yaitu segmen antara penampang 4-5, dengan adanya gradien temperatur di kedua sisinya. Gradien temperatur fluida kerja dapat ada karena perbedaan suplai kalor antara dua alat penukar kalor, yaitu *cold heat exchanger* (CHX), segmen 3-4, di suatu sisi dan *hot heat exchanger* (HHX), segmen 5-6, di sisi yang lain. Dalam desain model mesin di artikel ini, berkondisi khusus dengan luas penampang keluar CHX (disebut 4a) sama dengan luas penampang masuk REG (4b), sehingga di gambar 1 luas 4a sama dengan luas 4b, yang disebut luas 4. Demikian juga luas 5a, penampang keluar REG, sama dengan luas 5b, penampang masuk HHX, yaitu luas 5. Energi akustik E_a hasil amplifikasi REG, terbagi di titik percabangan menjadi E_b dan E_c . Energi E_c mengalir kembali dalam loop dan menjadi energi umpan yang kembali masuk CHX untuk di-amplifikasi lagi oleh REG, dan selanjutnya kembali ke HHX. Sebagian dari energi E_a mengalir ke loudspeaker sebesar E_b yang besarnya tergantung berbagai faktor, Hsu dan Lai (2023), Iniesta dkk. (2021). Dalam proses simulasi, nilai parameter loudspeaker terbatas karena komponen ini memiliki batas kejenuhan fisis menurut batasan parameter TSP, yaitu dalam kemampuannya mengkonversi energi akustik menjadi energi listrik, Gaikwad dkk. (2024). Faktor lain yang juga berpengaruh adalah pemilihan dimensi fisis loudspeaker, lokasi percabangan relatif terhadap regenerator di jalur loop, panjang saluran penghubung dari titik percabangan ke loudspeaker, dan besarnya beban resistor pada terminal keluaran listrik di loudspeaker, Hsu dan Lai (2023), Chen dkk. (2021).

2.2 Pemodelan efisiensi

Pembangkitan energi akustik oleh regenerator dinyatakan oleh 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 . Subscript dengan simbol 1 khusus dalam pers.1, yaitu p_1 dan U_1 , menunjukkan bahwa besaran itu adalah variable kompleks. Suplai kalor Q_h dimasukkan ke HHX agar tercipta gradien temperatur (dT_m/dx) terhadap temperatur sink yang terjaga konstan oleh CHX. Karakteristik fisik material regenerator diwakili dengan kontribusi

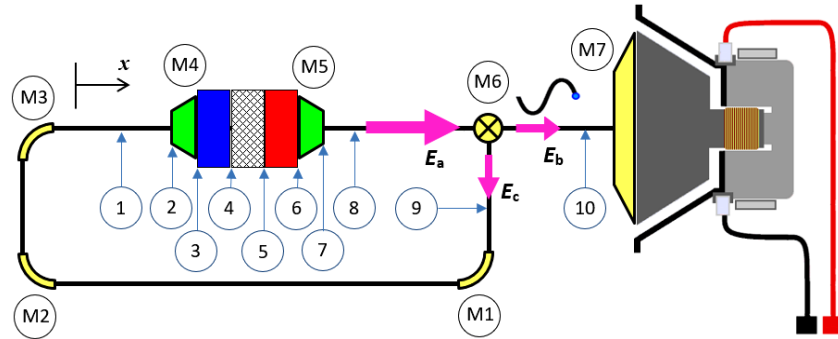
penetration depth δ_k dalam persamaan dikurangi dengan disipasi internal dalam regenerator, sesuai persamaan Swift (2001).

Energi akustik mesin E_a adalah hasil amplifikasi, yaitu beda antara daya akustik yang keluar REG E_a pada penampang 5 (E_{a5}) dengan daya akustik umpan dalam loop yang masuk ke dalam REG, (E_{a4}).

$$\frac{1}{2} \operatorname{Re}[gU_1 \tilde{p}_1] = \frac{1}{2} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \operatorname{Re}[\tilde{p}_1 U_1] \operatorname{Re}[f_\kappa] + \frac{1}{2} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \operatorname{Im}[\tilde{p}_1 U_1] \operatorname{Im}[-f_\kappa] \quad (1)$$

Jika kerugian aliran dalam loop diabaikan, maka E_a pada gambar 1 dapat diartikan sebagai berikut,

$$E_a = E_{a5} - E_{a4} \quad (2)$$



Gambar 1. Skema mesin termoakustik pembangkit listrik

Dengan demikian efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik (η_H) yang ditunjukkan dalam hasil simulasi adalah,

$$\eta_H = (E_a / Q_h) \quad (3)$$

Energi akustik yang mengalir dalam mesin terbagi dua di percabangan M6. Sebagian dari energi akustik mengalir ke dalam loop mesin E_c sebagai energi umpan untuk REG, yaitu E_{a4} . Sebagian lagi, yaitu E_c , mengalir ke arah cabang yang di ujungnya terpasang loudspeaker yang difungsikan sebagai linier alternator. Sebagian E_c kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Energi listrik E_E dapat diketahui secara simulasi, sehingga model mesin mempunyai efisiensi konversi energi akustik menjadi energi listrik sebesar,

$$\eta_E = (E_E / E_c) \quad (4)$$

Secara keseluruhan, efisiensi menyeluruh dari kinerja model mesin, yaitu efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik, mengikuti korelasi berikut,

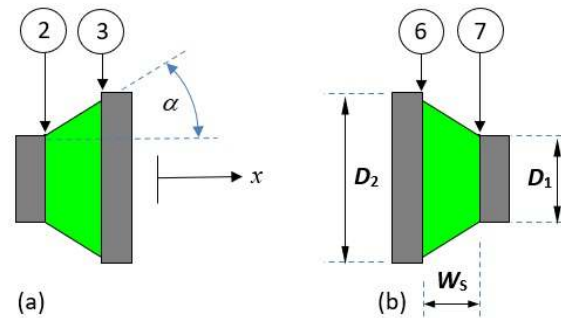
$$\eta = (\eta_H \cdot \eta_E) \quad (5)$$

Seluruh prosedur dan hasil simulasi dari model mesin termoakustik pembangkit listrik dalam artikel ini diperoleh dengan bantuan software open source Delta EC Versi 6.2, dari Ward dkk. (2008). Di dalam Delta EC, mesin dibagi menjadi beberapa segmen, dimana kondisi masuk dan keluar tiap segmen dapat diketahui dengan metode integrasi numerik satu dimensi secara built-in di dalam software.

2.3 Pemodelan kerugian

Loop mesin pada gambar 1 biasanya dimodelkan sebagai saluran ideal dengan anggapan tanpa hambatan yang dapat menyebabkan timbulnya kerugian aliran. Demikian juga model mesin Nurpatricia dkk. (2021), dibangun dengan asumsi saluran mesin adalah loop tanpa lengkungan, perubahan diameter, segmen berbentuk kerucut, atau segmen lain yang berpotensi menyebabkan kerugian energi akustik yang mengalir dalam loop tersebut. Bentuk saluran loop idealisasi seperti ini merupakan estimasi ideal namun sulit dibangun secara praktis. Saluran loop mesin nyata biasanya dirangkai dari beberapa segmen pipa lurus, segmen belokan, segmen konis, atau segmen lain yang dibutuhkan agar terbentuk satu loop lengkap. Sebagai konsekuensinya, model mesin harus didefinisikan ulang agar dapat mewakili berbagai bentuk geometri fisik berbeda yang ditambahkan ke saluran. Model saluran yang lebih realistis tersebut pada gilirannya menyebabkan perlunya pemodelan kehilangan aliran yang terjadi pada geometri tersebut. Kerugian aliran di belokan dan perubahan diameter tersebut biasanya disebut sebagai kerugian kecil.

Ekspresi kerugian minor (Δp) di saluran mesin termoakustik diadaptasi dari Ward dkk. (2008). Kerugian tersebut tergantung pada koefisien kerugian kecil K dan kecepatan aliran u . Kecepatan u pada (4) diturunkan dari laju aliran volumetrik dalam ekspresi kompleks U dari (1) atau (2), yang mengalir secara bolak balik terhadap aliran dalam arah x , yaitu arah loop sesuai gambar 1. Sebagai konsekuensinya, nilai numerik faktor K pada Persamaan (4) harus diatur secara berbeda, untuk aliran arah x positif (K^+) dan aliran dalam arah sebaliknya x negatif (K^-). Saluran yang membentuk loop mesin pada gambar 1, yaitu model mesin dari Nurpatricia dkk. (2021), terpasang dengan asumsi terbuat dari saluran tanpa belokan dan tanpa perubahan diameter. Hal tersebut menyebabkan biaya konstruksi menjadi mahal dan pada saat yang bersamaan akan lebih sulit untuk dibangun secara real, dan hal itu kurang praktis secara desain.



Gambar 2. Segmen konis dengan pembesaran diameter secara gradual, sesuai dengan penempatan segmen tersebut dalam orientasi terhadap sumbu x , (a) searah seperti pada M4, dan (b) berlawanan seperti pada M5

Dalam manufaktur komponen mesin, saluran tersebut biasanya dibuat dari pipa yang disambung dengan berbagai jenis konektor yang sesuai. Sebagai konsekuensinya, 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.

Tabel 1. Parameter segmen model Delta EC

Segmen	Parameter			Seting
	Nama	Simbol	Unit	
1 Konis 1	Panjang	W_{s1}	mm	12
	Area 2 In	A_2	cm ²	90
	Area 3 Out	A_3	cm ²	100
2 CHX	Panjang	L	mm	30
	Area 3 In	A_3	mm ²	100
	Area 4 Out	A_4	mm ²	960
3 Regenerator	Panjang	L	mm	18
	Area 4 In	A_4	mm ²	100
	Area 5 Out	A_5	mm ²	100
	Hydrolic Radius	r_h	micron	58
4 HHX	Panjang	L	mm	10
	Area 5 In	A_5	mm ²	100
	Area 6 Out	A_6	mm ²	100
5 Konis 2	Panjang	W_{s2}	mm	12
	Area 6 In	A_6	cm ²	90
	Area 7 Out	A_7	cm ²	100

Potensi kerugian minor yang belum diperhitungkan dalam hasil simulasi model mesin Nurpatricia dkk. (2023) ada di beberapa lokasi seperti ditunjukkan gambar 1, yaitu semua kerugian minor dari M1 sampai M7, kecuali M4. Pernyataan kerugian minor (Δp) secara umum yang terjadi dalam saluran mesin termoakustik (Ward dkk., 2008), ditunjukkan oleh persamaan 6.

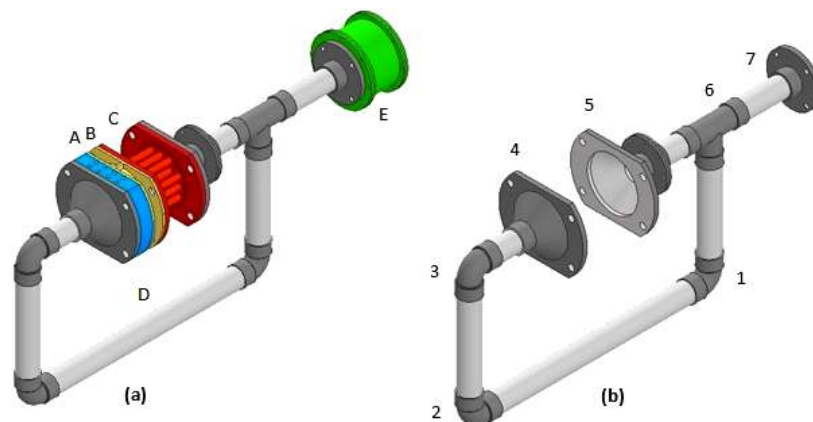
$$\Delta p = -\frac{1}{2} K u^2 \tag{6}$$

Secara aktual, sesuai gambar 1, kerugian minor dapat timbul dari belokan pipa M1, M2, dan M3. Selain itu, kerugian minor juga bisa timbul dari perubahan penampang saluran M4, M5, dan M7. Percabangan pipa M6 juga menjadi sumber terjadinya kerugian minor. Dalam makalah ini ditunjukkan perbandingan hasil simulasi model mesin pada dua kondisi. Kondisi pertama, yaitu model tanpa memperhitungkan adanya kerugian minor yang dalam tabel 1 disebut Model Ideal. Kondisi kedua, kondisi model setelah ditambahkan kerugian minor gabungan dari dua segmen konis yang dipasang dengan orientasi berkebalikan terhadap arah x , yaitu segmen M4 dan segmen M5.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik desain

Pada Gambar 2(a) ditunjukkan model CAD 3D mesin tanpa skala hasil simulasi Delta EC. Segmen DUCT (D) membentuk loop utama mesin. Segmen DUCT dan Loudspeaker (E) dikoneksikan dengan sebuah segmen sambungan T. Segmen A, B, dan C berturut-turut adalah komponen CHX, REG, dan HHX.



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

Gambar 2(b) adalah detail model 3D dari 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.

3.2 Karakteristik mesin

Parameter mesin hasil simulasi penelitian tahun 2021 dan 2022, Nurpatricia dkk. (2021), adalah Model Ideal dalam tabel 2. Dari simulasi tersebut ditemukan setting nilai parameter konvergen pada suatu nilai geometri Regenerator, HHX, dan CHX, sehingga efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik model mesin mencapai 12,76%, dan ini lebih tinggi 1,29% dari efisiensi model sebelumnya 11,47% (Nurpatricia dkk., 2020). Perubahan terjadi pada geometri regenerator, penampang disesuaikan menjadi 960 mm², dan radius hidrolis lebih kecil menjadi 0,0196 mm. Konstruksi regenerator tetap terbuat dari *wire mesh screen* dengan detail konstruksi seperti dalam McGaughy dkk. (2021) dan Gaikwad dkk. (2024). Ketebalan tumpukan material *wire mesh* kedua model dipertahankan tetap sama, 28 mm.

Tabel 2. Parameter mesin hasil simulasi model ideal, dibandingkan dengan model M4-M5

Komponen Mesin	Parameter			Model Ideal	Model M4-M5
	Nama	Symbol	Satuan		
Parameter Global	Energi akustik netto	E_1	W	33,26	36,55
	Efisiensi Kalor - Akustik	η_H	%	12,76	14,05
	Efisiensi Akustik - Listrik	η_E	%	82,54	82,54
	Efisiensi Kalor - Listrik	η	%	10,53	11,59
	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

Dari tabel 2 dapat dilihat bahwa aliran energi akustik dari regenerator adalah nilai netto yang merupakan beda amplifikasi aliran energi akustik di sisi keluar regenerator terhadap energi di sisi masuk. Energi akustik masuk regenerator adalah 57,02 W. Level energi ini diasumsi sama dengan energi keluar CHX, berdasarkan fakta desain bahwa tidak ada kerugian minor di celah interface CHX dengan REG, dengan diameter luar keduanya yang juga sama. Di sisi keluar REG, level energi akustik meningkat menjadi 93,57 W. Karena itu, amplifikasi netto energi akustik model mesin saat ini adalah 36,55 W. Amplifikasi energi akustik yang lebih tinggi dari model ideal menunjukkan bahwa penambahan model segmen konis dapat mengurangi obstruksi geometri dalam aliran fluida, sehingga aliran semakin mendekati kondisi *smooth flow*. Konstruksi geometri dan lokasi relatif HHX dan CHX terhadap REG tidak mengalami perubahan dari model sebelumnya, yaitu model Nurpatricia dkk. (2023), terutama pada panjang L dan area A. Segmen HHX tetap dikondisikan dengan panjang tetap 172 mm, baik pada kondisi simulasi ideal maupun setelah penambahan model kerugian minor. Demikian juga dengan luas area tiga komponen tersebut tetap 960 mm². Masukan kalor HHX tetap sama pada 260 W. Perubahan juga terjadi pada CHX, yang mengalami sedikit penyesuaian geometri komponen tersebut.

3.3 Kerugian Minor

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 termoakustik yang bergerak bolak balik pada suatu rentang osilasi tertentu, yang dikenal sebagai panjang karakteristik, Swift (2001). Dalam pemodelan kerugian minor K4 diambil nilai $K(+)$ = 1,00 dan $K(-)$ = 0,10, sedangkan pada K5 diambil nilai $K(+)$ = 0,10 dan $K(-)$ = 1,00, Ward dkk (2008). Pada setting tersebut, *minor losses* yang terjadi pada M4 adalah 1,05 W, sedangkan pada M5 adalah 3,89 W. Sehingga kerugian minor energi akustik E_1 gabungan yang terjadi pada konis segmen M4 dan M5 adalah 4,94 W, dan ini jauh lebih besar dari kerugian minor yang dapat dikalkulasi dengan penambahan M4 saja pada model Nurpatricia dkk. (2023). Perbedaan nilai kerugian yang cukup besar dapat diartikan bahwa, model mesin semakin dapat menggambarkan kondisi yang lebih nyata dari situasi yang mungkin terjadi jika model ini dibangun secara real.

Dengan penambahan dua model kerugian minor, energi akustik yang terdeteksi hilang menjadi lebih besar, namun demikian performa keseluruhan model menjadi lebih baik, karena amplifikasi energi akustik netto pada model yang saat ini 36,55 W lebih tinggi dibandingkan amplifikasi pada model ideal 32,26 W, atau menjadi lebih tinggi 3,29 W. Kondisi tersebut setara dengan kenaikan efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik sebesar 1,29%, dari 12,76 pada model ideal menjadi 14,05%. Secara singkat, dengan penambahan model segmen konis dapat lebih akurat dalam mengkompensasi pemodelan bawaan oleh simulasi dari software, yaitu dalam kasus sambungan segmen yang berbeda diameter, secara default dimodelkan sebagai kerugian minor *sudden contraction*.

Terdapat potensi kerugian minor yang terjadi dari percabangan ke arah loudspeaker, namun belum dimasukkan ke dalam model saat ini. Karena itu, efisiensi konversi energi akustik menjadi energi listrik untuk model ideal dengan model M4-M5 adalah sama, yaitu 82,54%. Dengan demikian efek *minor losses* yang terjadi

pada model saat ini belum berefek pada efisiensi konversi energi listrik model, dan perubahan efisiensi total yang terjadi hanya disebabkan oleh dua segmen konis yang sudah terpasang ke dalam model.

4. KESIMPULAN

Model mesin termoakustik yang dikopel dengan loudspeaker tetap dapat bekerja dengan baik, walaupun dua model kerugian minor segmen konis telah ditambahkan. Efisiensi konversi dari energi kalor menjadi energi akustik berubah dari 12,76% menjadi 12,73%. Simulasi akhir dengan memasukkan efek kerugian minor dari dua segmen juga menyebabkan energi akustik berguna berkurang dari 33,26 W menjadi 33,09 W, atau terjadi kehilangan energi akustik setara 0,17 W. Efisiensi total model dalam konversi energi kalor menjadi listrik berkurang relatif kecil dari 10,53% menjadi 10,50%, dan ini merupakan kontribusi langsung adanya efek kerugian minor dari dua komponen konis yang sudah terpasang pada model. Metode pemasangan model kerugian minor dari segmen konis dapat dijadikan referensi untuk simulasi lanjutan penambahan model kerugian minor yang diinduksi oleh segmen lain.

UCAPAN TERIMAKASIH

Disampaikan terima kasih atas pendanaan penelitian dari Universitas Mataram melalui LPPM Universitas Mataram dengan skema Penelitian PNBPU Universitas Mataram No.1471/UN18.L1/PP/2023.

DAFTAR NOTASI

A	: Luas penampang segmen (m^2)
D	: Diameter hidrolis suatu penampang segmen (m^2)
E	: Energi akustik, disuatu lokasi pada gambar sesuai subscript (W)
E_E	: Energi listrik (W)
g	: Faktor pembangkitan akustik
K	: Koefisien minor losses
L	: Panjang suatu segmen (m)
p_I	: Tekanan, domain kompleks (Pa)
p	: Tekanan fluida kerja (Pa)
T	: Temperatur (K)
U_I	: Laju volumetrik, domain kompleks (m^3/s)
u	: Kecepatan aliran fluida kerja (m/s)
W	: Panjang segmen konis (m)
f	: Faktor akustik kompleks
η_H	: Efisiensi koefisien energi dari kalor ke akustik
η_E	: Efisiensi koefisien energi dari akustik ke listrik
Re, Im	: Operator kompleks

DAFTAR PUSTAKA

- Chen G., Tang, L., Mace, B., Yu, Z., Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111170>.
- Gaikwad, M.K., Shinde S.U., Naidu, M.J., Jadhav, T.A., Kumar, R., Salunkhe, S., Cep, R., Nasr, E.A., Performance evaluation of looped tube thermoacoustic power generator using cyclic analysis, *Frontiers in Mechanical Engineering* 10, 2024, <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1357332>.
- Hsu, S.H., Lai, C.H., Evaluating the onset conditions of a thermoacoustic Stirling engine loaded with an audio loudspeaker, *Frontiers in Thermal Engineering* 3, 2023, <https://doi.org/10.3389/fther.2023.1241411>.
- Iniesta, C., Olazagoitia, J.L., Gros, J., Vinolas, J., Aranceta, J., Introduction to thermoacoustic Stirling engines - first steps and praxis, 19th International Stirling Engine Conference, E3S Web of Conferences 313, 08005, 2021, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131308005>.
- McGaughy, M., Wang, C., Boessneck, E., Salem, T., Wagner, J., A Traveling Wave Thermoacoustic Engine - Design and Test, *ASME Letters in Dynamic Systems and Control* 1, 031006, 2021
- Nurpatria, Syahrul, Pandiatmi, P., Sayoga, I.M.A., Mulyanto, A., Penentuan efisiensi konversi energi mesin termoakustik dengan simulasi parameter regenerator, *Prosiding SAINTEK LPPM UNRAM*, 2019.
- Nurpatria, Susana, I.G.B., Joniarta, I.W., Nurchayati, Tira, H.S., Peningkatan efisiensi mesin termoakustik, *Prosiding SAINTEK LPPM UNRAM*, 2020.
- Nurpatria, 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 LPPM UNRAM*, 2021.

- Nurpatricia, Mirmanto, Joniarta, I.W., Padang, Y.A., Susana, I.G.B, Simulasi pemasangan sebuah model kerugian minor perubahan penampang di konektor loop mesin termoakustik, *Dinamika Teknik Mesin* 13(1), 64-68, 2023.
- Suharyati, Pambudi, S.H., Wibowo, J.L., Pratiwi, N.I., Outlook Energi Indonesia 2019, BPPT Indonesia, 2019.
- Swift, G.W., *Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators*, Fifth Draft, Los Alamos USA, 2001.
- Ward, B., Clark, J., Swift, G.W., *Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DELTA-EC) Version 6.2*, Los Alamos USA, 2008.