

SIMULASI KOPLING LAUDPEAKER SEBAGAI ALTERNATOR LINIER DI MESIN TERMOAKUSTIK BERBAHAN BAKAR BIOMASSA

Nurpatria^{1*}, Mirmanto², Tri Rachmanto³, I M Adi Sayoga⁴, I G Bawa Susana⁵

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

⁴Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

⁵Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

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

ABSTRAK

Biomassa bergrade energi rendah seperti limbah pertanian dan massa padat lainnya dapat diperoleh relatif mudah dan murah di pedesaan. Bahan bakar biomassa jenis ini belum bisa digunakan secara langsung untuk mesin pembakaran dalam konvensional, namun dapat langsung dipakai sebagai sumber kalor mesin termoakustik. Sebuah model mesin termoakustik berdesain khusus telah dibuat menggunakan software *open source* simulasi Delta EC. Desain khusus mesin tersebut terletak di bagian alat penukar kalor, sehingga memungkinkannya menerima kalor dari aliran gas panas hasil pembakaran biomassa bergrade rendah secara langsung. Energi yang sudah dapat dibangkitkan oleh model mesin termoakustik tersebut belum berdayaguna, karena itu dilakukan simulasi lanjutan agar model mesin yang ada dapat dikopel dengan model loudspeaker yang difungsikan sebagai alternator liner. Dari penelitian ini telah dapat dibuat sebuah model mesin termoakustik yang dikopling baik secara akustik, maupun secara elektrik dengan loudspeaker sehingga dapat berfungsi sebagai generator pembangkit listrik sederhana. Mesin termoakustik yang dipakai adalah jenis *travelling wave* loop tunggal. Alternator terhubung dengan mesin menggunakan pipa yang dicabangkan dari loop utama mesin. Efisiensi konversi energi kalor ke energi akustik mesin pada suatu set nilai parameter mesin tertentu adalah 11,47%, dengan amplifikasi energi akustik oleh regenerator sebesar 30,71 W. Sebanyak 6,91 W energi akustik mengalir ke loudspeaker, dan dirubah menjadi 5,70 W energi listrik, setara dengan efisiensi konversi energi akustik menjadi energi listrik sebesar 82,54%. Sehingga, efisiensi mesin dalam keseluruhan proses pengkonversian energi kalor menjadi energi listrik adalah 9,46%.

Keyword: biomassa, mesin termoakustik, simulasi Delta EC, loudspeaker, pembangkit listrik

1. PENDAHULUAN

Potensi energi biomassa negara kita relatif besar, setara 32654 MWe. Dari jumlah tersebut tidak lebih dari 5% yang sudah dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar dalam sistem pembangkitan energi listrik *off-grid* dan *on-grid*, Yudiartono, 2018. Data tersebut menunjukkan bahwa masih terbuka kesempatan sangat prospektif bagi implementasi teknologi apapun yang menggunakan energi biomassa sebagai sumber bahan bakarnya. Dalam beberapa dekade terakhir, telah berkembang jenis teknologi mesin yang relatif baru, yaitu mesin termoakustik jenis pembakaran luar. 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. Mengacu pada beberapa aspek desain dari Yu *et al*, 2012 dan Piccolo A, 2018, telah dimulai studi dengan tahapan pemodelan secara simulasi untuk membangun mesin termoakustik

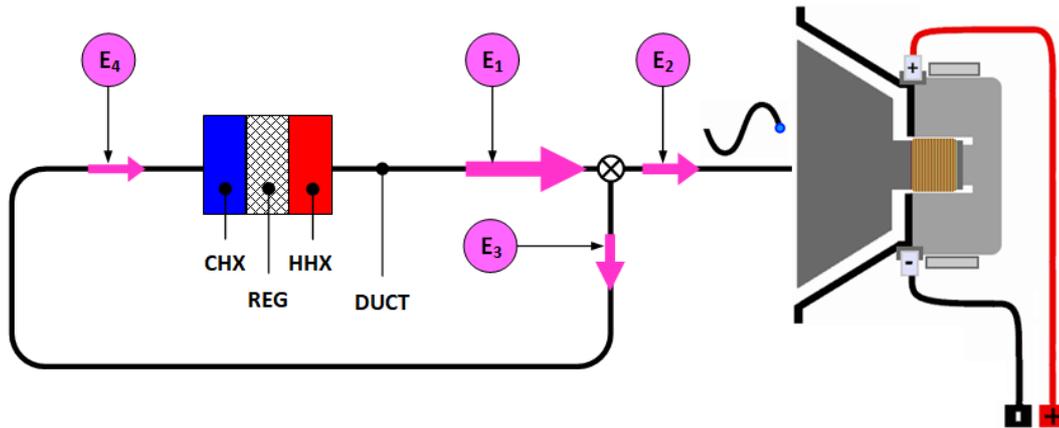
yang berkemampuan memanfaatkan biomassa limbah pertanian sebagai bahan bakar mesin ole Nurpatricia dkk, 2019. Model mesin termoakustik awal berhasil dibangun dengan efisiensi proses konversi dari energi kalor menjadi energi akustik model ini relatif rendah, yaitu 3,31%. Model yang berefisiensi lebih tinggi yaitu 7,16 %, berhasil dibangun dan ini berarti terjadi kenaikan efisiensi model sekitar 128%, Nurpatricia dkk, 2020.

Kemampuan dari model terakhir ini baru sampai pada tahap pembangkitan energi akustik, dan energi akustik tersebut hanya bersirkulasi di dalam mesin namun belum berdayaguna. Energi akustik yang telah berhasil dibangkitkan dapat diekstraksi dari sirkulasi internal gelombang akustik, kemudian dikeluarkan agar bisa dimanfaatkan, Abdoulla *et al*, 2017 dan Piccolo, 2018. Energi akustik tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik, misalnya dengan generator listrik jenis “alternator linier”, yang telah berhasil dilakukan Hamooh *et al*, 2019, Chen *et al*, 2015, dan Timer *et al*, 2018. Dalam praktek yang telah berhasil dibuktikan tersebut, “loudspeaker” dapat difungsikan sebagai alternator linier jika disetting sedemikian rupa agar beroperasi secara “*reverse acting*”. Diharapkan desain khusus pada komponen alat penukar kalor yang dapat menggunakan biomassa, energi listrik dapat dihasilkan oleh mesin termoakustik dengan memakai loudspeker sebagai alternator linier.

2. METODE

2.1 Pemodelan Mesin

Skema model mesin yang akan dibangun dalam penelitian ini seperti pada Gambar 1. Dalam gambar ditunjukkan metode pemasangan loudspeaker di model mesin yang sudah ada. Pemasangan loudspeaker dalam penelitian ini dimodelkan dengan percabangan saluran dari saluran loop mesin. Metode lain memasang loudspeaker adalah menempatkannya di dalam loop mesin, tanpa percabangan, Yu *et al*, 2012. Energi akustik E_1 terbagi di titik percabangan menjadi E_2 dan E_3 . Energi E_3 mengalir kembali dalam loop dan menjadi energi umpan untuk regenerator seperti pada model Gambar 1. Sebagian dari energi E_1 mengalir ke loudspeaker sebesar E_2 . Besarnya E_2 tersebut tergantung tidak hanya pada faktor kemampuan loudspeaker secara internal, tetapi juga pada faktor eksternal koneksi mesin dengan loudspeaker, Chen *et al*, 2015, Abdoulla *et al*, 2017. Dalam proses simulasi perlu diperhatikan bahwa loudspeaker memiliki batas kejenuhan fisis mengkonversi energi akustik menjadi energi listrik. Batas tersebut sangat bervariasi tergantung berbagai parameter TSP, Hamood *et al*, 2019, Abdoulla *et al*, 2017. Faktor internal lainnya adalah pemodelan yang benar dari pemilihan dimensi fisis loudspeaker. Selain itu, faktor eksternal juga berpengaruh. Diantaranya adalah 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.



Gambar 1. Skema mesin termoakustik pembangkit listrik

2.2 Pemodelan Simulasi

Pembangkitan akustik oleh regenerator (REG) dinyatakan oleh suku ruas kiri Pers.1 di bagian *Real* (Re) variabel kompleks untuk gelombang tekanan p_1 , laju aliran volume U_1 , dan faktor gain kompleks g . Suplai kalor Q_h dimasukkan ke alat penukar kalor bertemperatur tinggi (HHX) agar tercipta gradien temperatur (dT_m/dx) relatif terhadap temperatur rendah, yang diinginkan sesuai temperatur lingkungan sebagai sink pada alat penukar kalor bertemperatur tinggi (CHX). Kontribusi *penetration depth* δ_k dalam persamaan tersebut ada pada suku kompleks $Re[f_k]$. Pengaturan dimensi δ_k yang tepat akan membuat suku $Re[f_k]$ bernilai maksimum. Amplifikasi energi akustik mesin E_l adalah energi akustik ruas kiri Pers.1 dikurangi disipasi yang timbul dalam regenerator, Swift, 2001.

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

Energi akustik mesin E_l adalah $E_l = E_{1o} - E_{1i}$, yaitu beda antara daya akustik yang keluar REG (E_{1o}) terhadap daya akustik umpan loop ke dalam REG, yaitu E_{1i} yang ditunjukkan sebagai E_4 pada Gambar 1 jika kerugian pada CHX diabaikan. Dengan demikian efisiensi konversi energi kalor menjadi energi akustik di dalam simulasi adalah,

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

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.

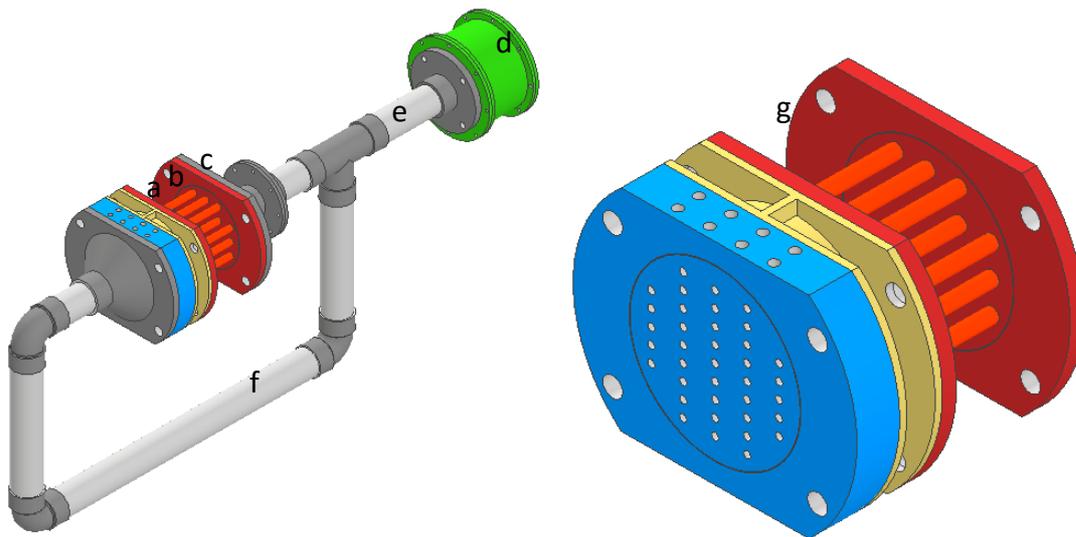
$$\eta = (\eta_H \eta_E) \quad (3)$$

Jika konversi energi akustik menjadi listrik dalam laoudspeaker adalah η_E , maka Pers.3 menyatakan efisiensi total kinerja mesin. Semua penyelesaian persamaan, ditambah dengan korelasi parameter lainnya yang tidak ditunjukkan di sini, diselesaikan secara simulasi dengan software open source Delta EC Versi 6.2, Ward *et al*, 2008.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Desain

Model mesin hasil simulasi Delta EC yang digambarkan tanpa skala seperti pada Gambar 2. Loop mesin terbentuk dari saluran DUCT, skema Gambar 1, dimulai dari sambungan e menuju ke arah CHX lalu kembali ke sambungan e. Loudspeaker terhubung dengan sebuah segmen duct, yaitu pipa di dalam gambar, dari percabangan e. Material pipa dapat disesuaikan dengan saat pemodelan.



Gambar 2. Gambar CAD mesin dan beberapa komponen utama sebagai interpretasi desain, semua dimensi tanpa skala.

Terlihat (a) CHX, (b) REG, (c) HHX, (d) loudspeaker, (e) sambungan, (f) segmen pipa, dan (g) detail desain CHX dan HHX yang berbeda disebabkan perbedaan interaksi fluida kerja kedua alat penukar kalor tersebut.

Porositas CHX relatif sangat kecil, nilainya ada di Tabel 1, sehingga didesain menggunakan blok material besi, dan ini menyebabkan terjadinya pendinginan tak langsung. Metode ini dipakai Yu *et al*, 2012. Sirkulasi air memasuki saluran atas, mendinginkan blok, lalu blok tersebut mendinginkan aliran osilasi bolak-balik partikel udara sebagai fluida kerja mesin. Desain ini secara teoritis mampu menjaga blok CHX tetap konstan pada temperatur 23°C. Ketebalan CHX juga relatif tipis.

Desain HHX dibuat berbeda karena pertukaran kalor terjadi antara aliran gas panas hasil pembakaran di luar dengan aliran udara di dalam pipa HHX, sehingga terjadi aliran menyilang tak bercampur. Porositas HHX lebih besar dan panjangnya sekitar 20 kali panjang CHX, sehingga digunakan desain pipa sekali lintas. Temperatur dinding dalam pipa HHX adalah 800 K. Agar gas hasil pembakaran dapat mengalir lancar dan berkontak sempurna dengan dinding luar pipa, diperlukan tambahan komponen pengarah aliran, yang tidak tampak di Gambar 2. Material REG ditempatkan dalam casing yang dijepit antara CHX dan HHX.

3.2 Karakteristik Mesin

Parameter mesin hasil simulasi dirangkum dalam Tabel 1, sedangkan Tabel 2 menunjukkan parameter utama loudspeaker. Hasil simulasi REG memberikan nilai porositas 82% dan radius hidrolis 0,02 mm. Kedua nilai ini dapat dipakai sebagai rujukan jika dipakai *wire mesh screen* (anyaman kawat logam berdiameter tipis) sebagai material pembuat REG. Metode konversi kedua nilai tersebut menjadi ukuran *wire mesh screen* dapat ditemukan di Yu *et al*, 2012, Hamood *et al*, 2019, dan Abdoulla *et al*, 2019. Dalam kasus pemodelan REG mesin ini, sejumlah *wire mesh* yang dipotong mengikuti bentuk penampang ditumpuk hingga tercapai ketebalan 28 mm.

Tabel 1. Parameter mesin hasil simulasi Delta EC

Komponen	Parameter			Model
	Nama	Simbol	Satuan	
Mesin	Energi akustik netto	E_1	W	30,71
Parameter Global	Efisiensi Kalor - Akustik	η_H	%	11,47
	Efisiensi Akustik - Listrik	η_E	%	82,54
	Efisiensi Kalor - Listrik	η	%	9,46
	Driving Force	(p/p _m)	%	8,8
	Frekwensi	f	Hz	82
	Panjang loop mesin	L	cm	364
	Regenerator	Panjang	L	mm
Area		A	mm ²	950
Porositas		Vol	%	82
Radius hidrolis		r_h	mm	0,02
HHX	Panjang	L	mm	160
	Area	A	mm ²	950
	Porositas	Vol	%	20
	Kalor input	Q _{in}	W	260
	Temperatur	T _H	K	800
CHX	Panjang	L	mm	8
	Area	A	mm ²	950
	Porositas	Vol	%	8
	Kalor keluar	Q _{out}	W	210
	Temperatur	T _C	K	296

Energi akustik yang dibangkitkan REG adalah nilai netto, merupakan hasil amplifikasi dari aliran energi akustik yang masuk REG. Energi akustik sesaat sebelum masuk REG adalah 58,19 W. Energi ini dianggap sama dengan energi akustik keluar dari CHX, jika kerugian minor di interface CHX dan REG diabaikan. Setelah keluar REG, energi akustik telah diperbesar menjadi 88,90 W. Karena itu, amplifikasi netto oleh REG seperti pernyataan Pers.1 adalah perbedaan keduanya, nilainya ditunjukkan dalam Tabel 1.

Pada setting nilai parameter loudspeaker di Tabel 1, resonansi akustik dapat menggetarkan koil laoudspeaker sehingga gerakan translasi yang memotong medan BL dapat membangkitkan listrik 5,70 W, dengan tegangan 18,50 V dengan arus 0,616 A. Penentuan keluaran daya listrik tidak hanya berdasarkan tegangan

dan arus, tetapi memperhitungkan juga pengaruh sudut fase dan impedensi, Ward *et al*, 2008, Timmer *et al*, 2018.

Tabel 2. Parameter loudspeaker hasil simulasi Delta EC

Komponen Mesin	Parameter			Model 2021
	Nama	Simbol	Satuan	
Loudspeaker	Resistansi koil	R	Ohm	6
	Area	A	mm ²	320
	Induktansi koil	L	H	5x10 ⁻⁴
	Produk (BL)	BL	T.m	30
	Massa transduser	M	kg	3x10 ⁻²
	Konstanta pegas transduser	K	N/m	1700
	Keluaran arus listrik	I	A	0,62
	Sudut fase keluaran arus	Ph(I)	deg	- 131
	Panjang cabang	L	mm	896

Kemampuan loudspeaker membangkitkan listrik tidak lepas dari penempatan posisi percabangan sambungan e. Posisi titik percabangan ini harus sedekat mungkin dengan lokasi dimana impedensi akustik bernilai minimum, dan ini sejalan dengan metode yang diterapkan Yu *et al*, 2012. Pemilihan posisi tersebut bertujuan agar laju aliran volumetrik U bernilai tinggi sehingga gerakan translasi koil alternator juga besar, dan pada akhirnya akan memaksimalkan pembangkitan daya listrik. Teknik ini juga diterapkan pada desain beberapa mesin lain seperti Chen *et al*, 2015 dan Piccolo, 2018. Keberhasilan prosedur kopel loop mesin dengan loudspeaker juga diindikasikan oleh nilai efisiensi konversi akustik ke listrik yang mencapai 82,54%, jika dibandingkan efisiensi kopling alternator dalam Yu *et al*, 2012, Hamood *et al*, 2019, Abdoulla *et al*, 2017, dan Abdoulla *et al*, 2019.

4. KESIMPULAN

Model mesin termoakustik yang dikopel dengan loudspeaker telah dapat bekerja dengan baik. Efisiensi konversi energi mesin tidak terlalu berbeda dibandingkan dengan prestasi kerja mesin lain. Penggunaan bahan bakar biomassa membuka peluang aplikasi desain mesin sebagai prototype alternatif berbiaya operasional murah. Efisiensi konversi energi kalor ke energi akustik mesin adalah 11,47%, dimana energi akustik netto yang dapat dihasilkan regenerator adalah 30,71 W. Energi akustik yang mengalir ke cabang loudspeaker adalah 6,91 W. Energi akustik ini dirubah oleh loudspeaker menjadi listrik berdaya 5,70 W, dengan efisiensi 82,54%. Efisiensi total mesin dari kalor menjadi listrik adalah 9,46%.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan terima kasih sebesar-besarnya atas persetujuan pendanaan penelitian oleh Universitas Mataram melalui LPPM Universitas Mataram Skema PNBPN UNRAM dengan Surat Perjanjian No.2925/UN18.L1/PP/2021.

6. DAFTAR REFERENSI

1. Yudiartono, 2018, "Outlook Energi Indonesia 2018", BPPT Indonesia
2. Nurpatra, N., dkk, 2019, "Simulasi parameter geometri regenerator mesin termoakustik", Prosiding SAINTEK 2019 LPPM UNRAM
3. Nurpatra, N., dkk, 2020, "Peningkatan efisiensi mesin termoakustik", Prosiding SAINTEK 2020 LPPM UNRAM
4. 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>
5. 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
6. 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
7. 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
8. Hamood, A., Jaworski, A., 2019, "Experimental investigations of the performance of a thermoacoustic electricity generator", ASEE19, E3S Web of Conferences 116, 00025 (2019)
9. Swift, G.W., 2001, *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Fifth Draft, Los Alamos USA
10. Ward, B., Clark, J., Swift, G.W., 2008, *Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion (DELTA-EC) Version 6.2*, Los Alamos USA
11. Abdoulla-Latiwish, K.O.A., Jaworski, A.J., 2019, "Two-stage travelling-wave thermoacoustic electricity generator for rural areas of developing countries", *Applied Acoustics* 151, (2019) 87-98
12. Piccolo, A., 2018, "Study of Standing-Wave Thermoacoustic Electricity Generators for Low-Power Applications", *Appl. Sci.* (2018) 8, 287, DOI:10.3390/app8020287
13. 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
14. THATEA, 2012, *Thermoacoustic Technology for Energy Applications*, ECN Netherlands