

Pengaruh Suhu Dan Volume Gas Kerja Terhadap Daya Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Termal Surya Menggunakan Mesin Stirling

Rizki Pratama Putra¹; Hasna Satya Dini²; Novi Gusti Pahiyanti³

^{1, 2, 3}Sekolah Tinggi Teknik PLN

¹rizki@sttpln.ac.id; ²novigusti@sttpln.ac.id; ³hasna@sttpln.ac.id

ABSTRACT

This research aims to investigate the influence of the temperature and the volume of stirling engine working gas on the power output of the solar thermal power plant which uses stirling engine. The methods used in this study are literature review on mathematical model of the system, the observations of the working stirling engine directly to see optimization opportunity, and simulation using simulink to see the output of the plant. The result obtained in this study are ; in general, system performance is strongly influenced by the temperature of the heating plate which is directly related to the working temperature of the gas. The heater plate temperature value is proportional to the output power provided, the higher the temperature of the heater plate, the greater power output will be obtained. From the results of the simulation also seem that high working gas temperatures reduces oscillation of the power output. the effect of the working gas volume does not significantly influence the output power. As for what can be concluded is, in the system that has been made, the main factor affecting the performance of the generating system is the temperature of the heating plate. So that performance optimization of the generating system can be further carried out in the parts related to these parameters.

Keywords: Solar thermal, Stirling engine, Electric power

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh suhu kerja gas dan volume kerja terhadap keluaran daya dari pembangkit listrik tenaga panas surya yang menggunakan mesin stirling. Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah studi literatur mengenai model matematis sistem, pengamatan kerja mesin stirling secara langsung untuk melihat peluang optimasi dari sistem yang akan dibuat, dan simulasi menggunakan simulink dari model matematis sistem pembangkit untuk melihat output keluaran sistem pembangkit yang dibuat. Adapun hasil yang didapatkan diantaranya adalah secara umum kinerja sistem pembangkit bergantung pada perbedaan suhu antara pelat pemanas dan pendingin pada mesin stirling. Nilai suhu pelat pemanas sebanding dengan daya output yang diberikan, semakin tinggi suhu pelat pemanas semakin besar daya output yang dikeluarkan. Dari hasil simulasi juga terlihat bahwa beda suhu kerja yang tinggi mengurangi osilasi putaran rotor generator. Untuk perubahan volume gas kerja sendiri tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap perubahan daya output sistem pembangkit. Adapun yang dapat disimpulkan adalah, pada sistem yang telah dibuat faktor utama yang mempengaruhi kinerja sistem pembangkit adalah suhu dari pelat pemanas sehingga optimasi kinerja sistem pembangkit lebih lanjut dapat dilakukan pada bagian-bagian yang berkaitan dengan parameter tersebut.

Kata kunci: energi panas surya, mesin stirling, energi listrik

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi termal surya diketahui memberi aspek yang menguntungkan dibandingkan menggunakan sel surya dari segi biaya pembangkitan per kWh. Meskipun untuk pembangkitan skala besar, biaya instalasi dari pembangkit listrik tenaga termal surya menjadi hampir sama dengan pembangkit listrik menggunakan sel surya [1].

Pada penelitian ini akan dikaji alternatif lain dengan menggunakan mesin termodinamik yaitu mesin stirling. Penggunaan mesin stirling untuk mengkonversi energi panas menjadi energi gerak telah lama digunakan dalam dunia industri. Penggunaan mesin stirling yang terkopel dengan generator akan membuat pemanfaatan energi panas surya menjadi energi listrik dapat terealisasi dengan baik.

Penelitian mengenai pengembangan mesin stirling dan pembangkitan energi listrik menggunakan mesin stirling telah banyak dilakukan, diantaranya penelitian mengenai efisiensi jenis-jenis mesin stirling dimana diketahui mesin stirling tipe gamma memberikan efisiensi tertinggi untuk suhu operasi yang rendah. Hal ini diketahui terjadi karena pada mesin stirling tipe gamma luas penukar panas dan penukar dingin besar dan juga piston tenaga memiliki luas area kerja yang relatif kecil dibandingkan ruang ekspansi gas sehingga proses transfer daya mekanik oleh gas menjadi lebih efisien [2].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mike Mihao disebutkan beberapa perlakuan dapat ditambahkan pada proses operasi mesin stirling untuk meningkatkan keandalannya yaitu dengan mengatur posisi lengan ayun dan juga menempatkan mesin stirling dalam wadah bertekanan untuk mencegah kebocoran gas kerja sehingga diharapkan efisiensi mesin tetap terjaga [3].

Sergio Bittanti pada tahun 2005 mencoba mensimulasikan mesin stirling menggunakan model ruang keadaan orde 3 dan menyelesaikannya secara numerik. Pada penelitian tersebut ada beberapa parameter dinamik yang tidak dikehendaki dibuang dari model matematis. Pada penelitian tersebut juga dicoba dibuat suatu sistem pengontrolan daya mekanik mesin stirling tersebut dengan mengatur suhu dari gas kerja mesin stirling. Hasil yang didapatkan cukup memuaskan karena bersesuaian dengan hasil eksperimen. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa parameter dinamik yang berubah cepat dapat dihilangkan dari perumusan model matematis karena tidak mempengaruhi hasil simulasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Robson Robson, A. P. memberikan informasi mengenai fenomena-fenomena yang terjadi pada proses kerja mesin stirling diantaranya yaitu mengenai pengaruh perubahan suhu pada tingkat tertentu yang memberikan efek khusus terhadap torka yang dihasilkan [4].

Penelitian yang dilakukan oleh Jahromi, memberikan simulasi konversi energi termal menjadi energi listrik menggunakan mesin stirling tipe beta. Pada penelitian tersebut digunakan model matematis orde 2. Pada simulasi yang dihasilkan diketahui terjadi osilasi torka dan kecepatan rotor generator, sehingga perlu digunakan regulator tegangan pada sisi output generator untuk menstabilkan daya keluaran generator [5].
(Paragraf diperbaiki dan spasinya)

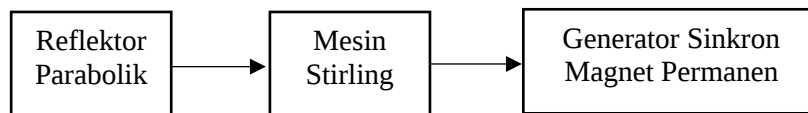
Berdasarkan informasi dari penelitian-penelitian tersebut maka dalam penelitian tujuan yang ingin dicapai adalah menyelidiki pengaruh suhu gas kerja pada mesin stirling

terhadap output generator pada sistem pembangkit tenaga listrik menggunakan panas surya.

2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

2.1. Gambaran umum sistem pembangkitan

Secara umum sistem pembangkitan energi listrik menggunakan mesin stirling dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 11. Skema sistem pembangkitan

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa mula-mula panas sinar matahari dikumpulkan menggunakan reflektor parabolik. Sinar matahari yang terkumpul ini kemudian diarahkan ke pelat penukar panas mesin stirling sehingga suhu pelat tersebut akan naik dan dengan proses konduksi suhu gas kerja akan berubah dan akhirnya akan membuat mesin stirling beroperasi.

Energi mekanik dari mesin stirling kemudian akan disalurkan ke generator dengan mengkopel roda gila mesin stirling dengan rotor generator, untuk kemudian diubah menjadi energi listrik. Dalam simulasi suhu akan divariasikan dengan nilai suhu yang lebih tinggi menandakan intensitas cahaya matahari yang lebih tinggi. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan matlab/simulink kemudian akan disimulasikan untuk melihat pengaruh perubahan suhu terhadap output atau keluaran daya listrik yang dihasilkan oleh generator.

2.2. Mesin stirling

Dalam pemodelan mesin stirling, proses kerja dan asumsi dasar dari mesin stirling harus ditentukan terlebih dahulu. Untuk proses kerja dari mesin stirling tipe gamma sendiri dimulai dari pemanasan pelat pemanas yang berada dibagian bawah mesin. Panas dari pelat pemanas (dianggap konstan) kemudian ditransfer ke gas kerja dengan proses konduksi sehingga gas kerja berekspansi dan mendorong piston daya keatas sehingga sudut putar flywheel (θ) berubah. Pada tahap ini energi mekanik disalurkan dari gas yang berekspansi ke piston daya kemudian ke roda gila atau dalam hal ini rotor generator yang terkopel dengan mesin stirling. Beberapa saat kemudian karena konfigurasi dari lengan ayun piston daya dan dispacer yang berbeda 90° maka piston displacer bergerak ke bawah membuat ruang pertukaran panas mengecil dan kemudian gas kerja yang berada di bagian atas piston displacer akan didinginkan oleh pelat pendingin. Gas kerja kemudian akan menyusut volumenya karena proses pendinginan tersebut sehingga akan menarik turun piston daya dan akan terjadi proses transfer daya mekanik dari gas kerja ke piston daya pada proses kompresi ini. Proses naik turunnya piston daya yang dirangkai dengan lengan ayun akan terjadi berulang-ulang dan akan memutar rotor generator.

Dari proses kerja tersebut diasumsikan beberapa hal utama diantaranya yaitu:

- Suhu kerja gas dianggap seragam saat terjadi pemanasan dan pendinginan (tidak ada gradien temperatur)
- Elemen-elemen friksi yang mempengaruhi kecepatan mesin digabung menjadi satu
- Tidak ada transfer daya panas ke piston, piston dianggap terisolasi termal
- Massa piston diabaikan karena dianggap relatif kecil
- Kebocoran gas kerja hanya terjadi pada silinder daya
- Pergerakan piston displacer sinusoid dengan beda fasa 90 derajat mendahului piston daya

Adapun parameter-parameter terkait kerja mesin stirling ini adalah sebagai berikut:

θ	posisi sudut dari roda gila (flywheel)
$\dot{\theta}$	kecepatan sudut flywheel
$\ddot{\theta}$	percepatan sudut flywheel
S_e	entropi total dari gas kerja
S_h	entropi yang ditransfer oleh sumber panas
S_c	entropi yang dilepas ke udara luar oleh pelat pendingin
N_e	jumlah mol gas kerja
R_e	radius lengan ayun pada flywheel
A_{sc}	area transfer panas pada silinder
P_{pc}	perimeter piston daya
A_h	area transfer panas pada pelat pemanas
A_c	area transfer panas pada pelat pendingin
T_e	temperatur gas kerja
A_l	area kebocoran
A_p	area piston daya
V_c	volume gas kerja
m	massa molar udara
R	konstanta gas kerja
S_o	entropi jenis dari udara pada $T=300$ K
T_o	temperatur awal dari gas kerja
P_a	tekanan udara luar
P_o	tekanan gas kerja
C_v	kalor jenis volume konstan
τ_e	torka mekanik dari mesin stirling
τ_{elec}	torka elektromagnetik dari generator
b	konstanta redaman
I	inersia rotor generator
μ	konstanta transfer panas dari silinder

Persamaan posisi lengan ayun (y)

$$y = R_e(1 + \sin \theta) \quad (1)$$

Area transfer panas A_h dan dingin A_c

$$A_h = A_{sc}(1 + \cos \theta) \quad (2)$$

$$A_c = A_{sc}(1 - \cos \theta) + P_{pc}y \quad (3)$$

Perubahan entropi pada daerah panas $\dot{S}_h$ dan dingin $\dot{S}_c$

$$\frac{dS_h}{dt} = \frac{A_h \mu (T_h - T_e)}{T_e} \quad (4)$$

$$\frac{dS_c}{dt} = \frac{A_h \mu (T_e - T_c)}{T_e} \quad (5)$$

Perubahan mol gas

$$\frac{dN_e}{dt} = -A_l \sqrt{2\rho_e(P_e - P_a)} \quad (6)$$

Perubahan entropi udara

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{S_e}{N_e} \frac{dN_a}{dt} \quad (7)$$

Perubahan entropi gas kerja

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{dS_h}{dt} - \frac{dS_c}{dt} + \frac{dS_a}{dt} \quad (8)$$

Volume gas kerja

$$V_e = V_c + A_p y \quad (9)$$

$$\bar{v}_e = \frac{V_e}{mN_e} \quad (10)$$

Temperatur gas kerja

$$T_e = T_0 \left(\frac{\bar{v}_e}{\bar{v}_0} \right)^{\frac{-R}{c_v}} \exp \frac{\bar{s}_e - \bar{s}_0}{c_v} \quad (11)$$

Tekanan gas kerja

$$P_e = P_0 \left(\frac{\bar{v}_e}{\bar{v}_0} \right)^{-\left(\frac{-R}{c_v} + 1\right)} \exp \frac{\bar{s}_e - \bar{s}_0}{c_v} \quad (12)$$

Gaya output

$$F_e = (P_e - P_a)A_p \quad (13)$$

Torka output

$$\tau_e = F_e R_e \cos \theta \quad (14)$$

Persamaan torka generator-mesin stirling

$$\tau_e - \tau_{elec} = b\dot{\theta} + I\ddot{\theta} \quad (15)$$

2.3. Generator sinkron magnet permanen

Generator sinkron magnet permanent dipilih dalam perancangan sistem yang dibuat sebab memiliki berbagai keuntungan, diantaranya yaitu penggunaannya yang praktis tanpa memerlukan arus eksitasi dari luar. Pada sistem yang dibuat, generator sinkron magnet permanen mengkonversi daya mekanik menjadi daya listrik. Permodelan matematis dari generator direpresentasikan dengan model ruang keadaan orde 2. Distribusi belitan stator dianggap sinusoidal sehingga gaya gerak listrik yang diinduksikan juga sinusoidal. Dalam memodelkan sistem listrik generator, persamaan akan direpresentasikan ke dalam kerangka referensi rotor atau q-d frame.

Adapun persamaan generator sinkron magnet permanen adalah sebagai berikut:

$$i_d(R + R_L) + L_q P \omega_r i_q - L_d \frac{di_d}{dt} = 0 \quad (16)$$

$$i_d(R + R_L) - L_q P \omega_r i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \lambda P \omega_r = 0 \quad (17)$$

$$\tau_{elec} = 1.5P[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (18)$$

Dimana,

i_q, i_d = arus komponen q dan d

i_q, i_d = arus komponen q dan d

i_q, i_d = arus komponen q dan d

R, R_L = resistansi stator dan resistansi beban

ω_r = kecepatan sudut rotor

P = jumlah pasang kutub

τ_{elec} = torka elektromagnetik

λ = amplitud flux yang diinduksikan oleh magnet permanen

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

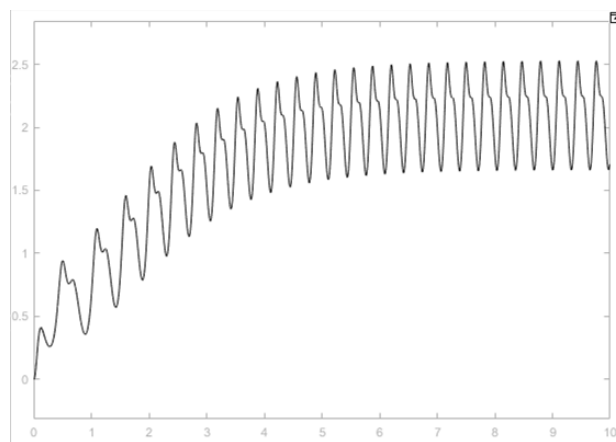
Model matematis yang telah dibuat kemudian disimulasikan menggunakan simulink. Parameter yang divariasikan pada simulasi adalah suhu pelat pemanas dan volume gas kerja. Generator dihubungkan dengan beban resistif konstan 2 ohm kemudian daya yang diserap oleh resistor akan dilihat dengan variasi parameter suhu dan volume gas. Beban listrik dihubungkan langsung ke terminal generator dan tanpa ada pengontrolan. Parameter gas kerja yang digunakan dalam simulasi adalah parameter udara bebas dimana tidak digunakan gas khusus dalam silinder mesin stirling. Untuk keadaan awal simulasi parameter yang diatur adalah entropi awal dan jumlah mol gas awal sebab gas dianggap memiliki suhu ruangan pada saat awal simulasi. Pada simulasi dengan volume gas kerja yang bervariasi, tekanan gas akan tetap dijaga konstan itu berarti dimensi mesin stirling yang berubah jika diterapkan di praktek nantinya.

Hubungan suhu gas kerja dari mesin stirling terhadap suhu pelat pemanas dapat dilihat pada persamaan 11. Dalam simulasi yang diamati adalah suhu pelat pemanas

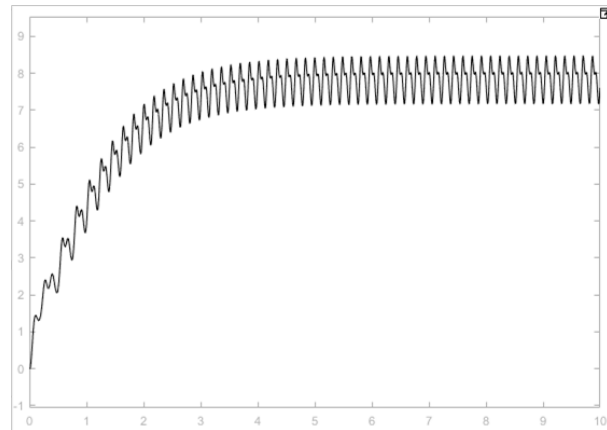
yang berhubungan dengan panas dari konsentrator parabolik dan juga suhu gas kerja. Suhu pelat pemanas yang divariasikan adalah 400 K, 500 K dan 600 K. Hubungan daya keluaran dan suhu pelat pemanas dapat dilihat pada gambar 2, gambar 3 dan gambar 4. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa semakin tinggi suhu pelat pemanas maka daya output dari generator akan semakin besar pula. Dari pemilihan variasi nilai suhu belum terlihat tanda-tanda saturasi daya dari suhu yang dipilih. Ini menandakan suhu kerja dari mesin stirling yang dirancang masih bisa ditingkatkan, namun karena sumber panas berasal dari sinar matahari maka dengan suhu 600° K pada kondisi nyata sulit dicapai. Selain itu, osilasi daya output juga terjadi pada setiap simulasi dengan amplitude osilasi semakin meningkat dengan menurunnya suhu kerja. Ini juga terlihat dari simulasi putaran rotor generator yang juga mengalami osilasi. Hal tersebut menandakan bahwa osilasi daya bukan berasal dari karakteristik generator tapi berasal dari karakteristik mesin stirling yang digunakan.

Selanjutnya simulasi dijalankan dengan mengubah volume gas kerja atau mengubah dimensi dari mesin stiling. Suhu pelat pemanas dibuat tetap yaitu 600 K. Volume gas kerja divariasikan menjadi $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, dan $12 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Adapun hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 5, Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.

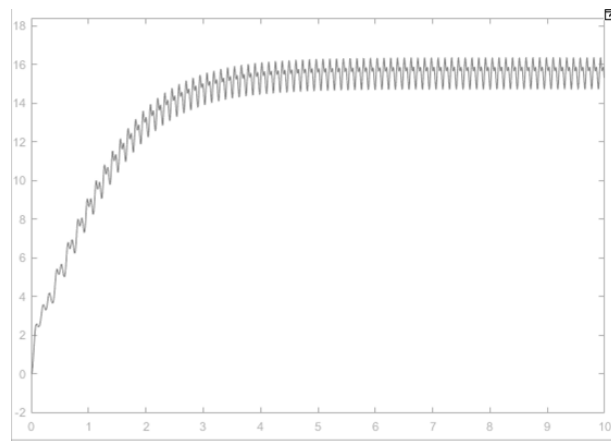
Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin tinggi volume gas kerja maka daya output generator yang dihasilkan juga semakin besar namun selisihnya tidak signifikan. Adapun perubahan osilasi daya yang terjadi pada pengaturan suhu pemanas tidak terlihat dipengaturan volume gas kerja. Mengubah volume gas kerja maka itu berarti dimensi tabung mesin stirling harus diubah. Selain itu volume gas yang meningkat juga akan membuat energi untuk menaikkan suhunya akan bertambah dan tentunya akan mempengaruhi efisiensi kerja sistem pembangkitan.



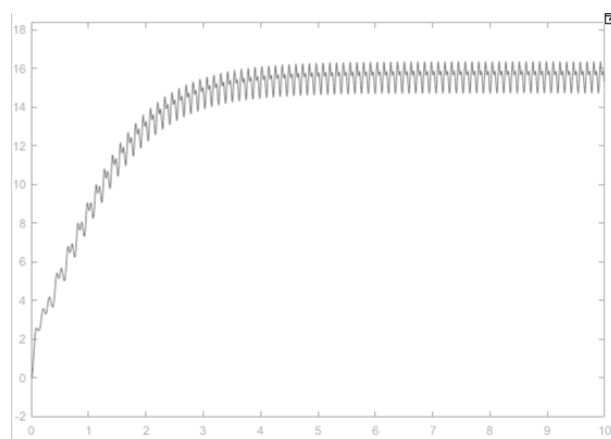
Gambar 12. Pengaruh suhu pelat pemanas 400° K terhadap daya keluaran generator



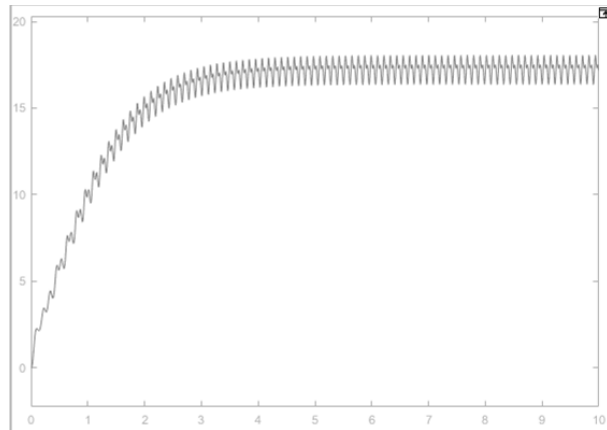
Gambar 13. Pengaruh suhu pelat pemanas 500° K terhadap daya keluaran generator



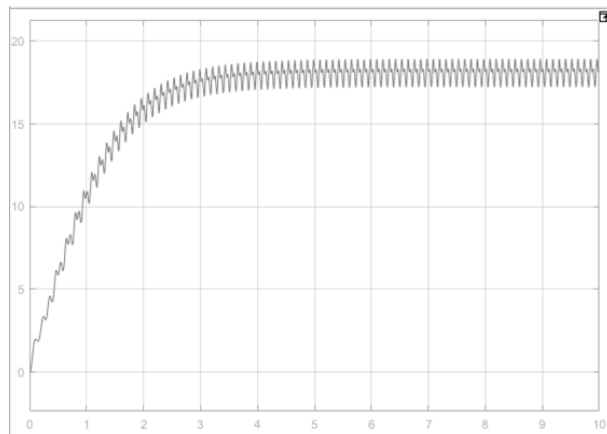
Gambar 14. Pengaruh suhu pelat pemanas 600° K terhadap daya keluaran generator



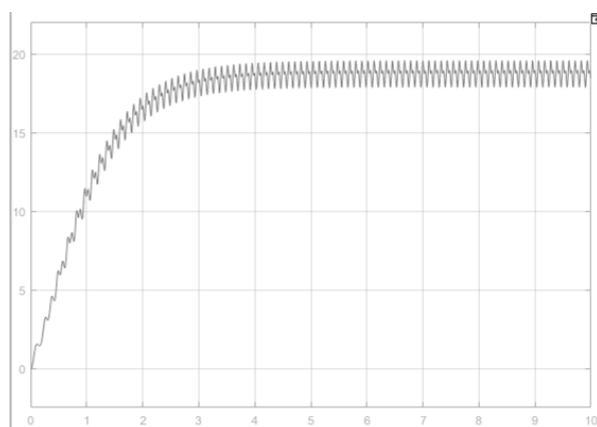
Gambar 15. Pengaruh volume gas kerja ($v_e = 4.3 \times 10^{-5} m^3$) terhadap daya keluaran generator



Gambar 16. Pengaruh volume gas kerja ($v_e = 5 \times 10^{-5} m^3$) terhadap daya keluaran generator



Gambar 17. Pengaruh volume gas kerja ($v_e = 8 \times 10^{-5} m^3$) terhadap daya keluaran generator



Gambar 18. Pengaruh volume gas kerja ($v_e = 12 \times 10^{-5} m^3$) terhadap daya keluaran generator

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

Pemodelan sistem pembangkitan dapat dilakukan dengan analisa model ruang keadaan orde 2. Dimana hasil simulasi dapat menunjukkan hubungan perubahan daya output generator terhadap perubahan parameter generator stirling seperti suhu pelat pemanas dan volume gas kerja.

Dari hasil simulasi terlihat bahwa suhu pelat pemanas mempengaruhi putaran mesin stirling dan juga output daya generator sinkron. Semakin tinggi suhu pelat pemanas maka daya output dari sistem pembangkitan juga semakin besar dan osilasi putaran rotor generator dan juga daya outputnya semakin kecil.

Pada pengaturan variabel volume gas kerja juga terlihat bahwa daya output sebanding dengan volume gas kerja, semakin besar volume gas kerja maka daya output generator juga akan semakin besar. Namun peningkatan volume kerja gas yang signifikan tidak memberikan kenaikan daya output yang berarti. Ini berarti optimasi kerja mesin stirling dengan menaikkan volume gas kerja tidak meningkatkan efisiensi sistem pembangkitan sebab besar energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu dan tekanan gas kerja sebanding dengan volume gas kerja itu sendiri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada STT-PLN yang telah memberikan bantuan dana atas terselenggaranya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. o. Energy, 2009, 2010. Renewable Energy Data Book
- [2] Abuelyamen, Ahmed and Ben-Mansour, Rached, 2018. "Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling," International Journal of Thermal Sciences, vol. 132, pp. 411—423.
- [3] M. M. He, 2016. "Stirling Engine for Solar Thermal Electric Generation," University of California, Berkeley.
- [4] Robson, Andrew Peter, 2007. "A Third Order Analysis of a Low Temperature Differential Ringbom Stirling Engine," Edinburgh Napier University.
- [5] Jahromi, Mehdi Zareian and Bioki, Mohammad Mehdi Hosseini and Fadaeinedjad, Roohollah, 2011. "Simulation of a stirling engine solar power generation system using Simulink," dalam International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference.