

ANALISIS TERMODINAMIKA SIKLUS HIBRID UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI

I Made Astina⁽¹⁾, Kadek Edy Kurniawan⁽²⁾ dan Merly Pastalozi⁽¹⁾

⁽¹⁾Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132
E-mail: astina@soon.com

⁽²⁾PT Tripatra Engineers & Constructors, Jakarta

Ringkasan

Modifikasi sistem pembangkit daya siklus standar tenaga panas bumi merupakan salah satu alternatif penting yang dapat dilakukan dalam efisiensi konversi energi termal menjadi energi listrik. Kombinasi siklus Brayton dengan sumber energi fosil dengan siklus Rankine yang memanfaatkan energi panas bumi dengan berbagai modifikasi dijadikan pusat perhatian dalam studi ini. Pembangkit Panas Bumi Kamojang dijadikan sebagai objek studi kasus. Sebuah perangkat lunak dikembangkan untuk evaluasi siklus termodinamika dengan beberapa modifikasi secara akurat. Perangkat lunak tersebut didukung dengan database sifat-sifat termodinamika dari model-model termodinamika. Analisis siklus hibrid telah dilakukan dan dibandingkan dengan siklus Rankine yang berdiri sendiri untuk sumur panas bumi di Kamojang sesuai dengan data dan asumsi yang rasional. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan daya dapat mencapai 157,88% dan peningkatan efisiensi mencapai 58,17% untuk fluida kerja organik R-134a. Penggantian R-134a dengan fluida kerja organik R-600 memberikan hasil peningkatan daya sebesar 162,89% dan efisiensi sebesar 63,76%. Rasio peningkatan daya bersih terhadap masukan energi dari bahan bakar adalah 0,52. Peningkatan yang tinggi ini diperoleh pada kondisi yaitu, temperatur masuk turbin gas 1100°C, rasio tekanan 20, temperatur gas keluar steam heater 350°C, temperatur uap panas bumi keluar steam heater 250°C, tekanan dan temperatur masuk turbin organik adalah 35 bar dan 340°C.

Abstract

Modification of the conventional cycle in a geothermal power plant is an alternative way that can be conducted in efficient conversion of thermal energy to be electric energy. Combination of Brayton cycle with fossil fuel energy sources and Rankine cycle utilizing geothermal energy is interest of this study. Kamojang Geothermal power plant is chosen as an object of case study. A software was developed to accurately evaluate the thermodynamic cycle with any modification. The software is supported by thermodynamic properties database directly derived from equations of state. Hybrid cycle analysis was conducted by comparing the conventional geothermal system operating with independent Rankine cycle such as the current Kamojang geothermal power plant in accordance with rational data and assumptions. Simulation results show that 157.88% of power increment, 58.17% of efficiency increment for using organic working fluid R-134a. Replacing R-134a with organic working R-600 afford 162.89% of power increment and 63.76% of efficiency increment. Ratio of the net power increment respect to the heating input of fuel is 0.52. This high enhancement is achieved for gas turbine inlet temperature of 1100°C, pressure ratio of 20, gas temperature from steam heater at 350°C, steam temperature from the heater at 250°C, and organic turbine inlet pressure and temperature at 35 bars and 340°C, respectively.

Keywords: efisiensi termal, siklus termodinamika, geothermal.

1 PENDAHULUAN

Peningkatan pertumbuhan dunia industri dan jumlah penduduk telah mengakibatkan kebutuhan energi semakin meningkat pula. Kebutuhan energi di Indonesia masih bergantung pada bahan bakar minyak bumi.

Demikian juga penyediaan kebutuhan energi listrik nasional yang masih sangat bergantung pada pembangkit berbahan bakar minyak (BBM). Panas bumi yang merupakan sumber energi terbarukan berpotensi untuk dikembangkan sebagai sumber penghasil listrik. Berbagai negara telah memanfaatkan energi panas bumi

untuk memenuhi kebutuhan listrik. Dari tahun 1995 hingga tahun 2000 pemanfaatan energi panas bumi terus meningkat. Khusus untuk Indonesia peningkatan pemanfaatan energi panas bumi mencapai angka 90,3% [1,2].

Pemanfaatan energi panas bumi untuk penghasil listrik relatif tidak berbahaya bagi lingkungan dibandingkan dengan pembangkit dengan BBM. Tingkat pencemarannya rendah pada udara dibanding dengan pembangkit berbahan bakar minyak, gas, dan batu bara. Pencemaran udara terbesar akibat emisi gas CO₂ berasal dari pembangkit listrik dengan bahan bakar batu bara dan gas alam adalah 32,7%, pembangkit dengan bahan bakar minyak adalah 20,6% dan polusi dari pembangkit listrik panas bumi hanya sebesar 3% [3].

Usaha peningkatan efisiensi dengan cara penggabungan turbin gas dengan pembangkit tenaga panas bumi konvensional dapat dilakukan. Berbagai kondisi optimal untuk sistem terintegrasi itu telah dilaporkan [4]. Kemungkinan untuk pemanfaatan sumber panas dari panas bumi dengan temperatur yang lebih rendah telah dikaji oleh Nowak et al. [5]. Mereka mengajukan beberapa alternatif dengan implementasikan siklus absorpsi uap yang difungsikan sebagai pompa kalor. Sedang sebuah proyek pembangkit panas bumi di Chena Hot Spring, Alaska yang instalasi pertamanya telah beroperasi mulai bulan Juli 2006 dan menghasilkan daya sebesar 200 kW dengan siklus Rankine organik dan fluida kerja R-134a. Sistem ini dipilih karena air sumber panas bumi bertemperatur rendah yakni 70°C [6].

Paper ini memaparkan sebuah hasil studi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal pembangkit panas bumi dengan mengusulkan siklus hibrid alternatif. Kinerja siklus hibrid dan peningkatan yang diperoleh dibandingkan dengan siklus Rankine untuk pembangkit panas bumi Kamojang. Pengaruh berbagai fluida kerja organik pada kinerja siklus hibrid disimulasikan dengan menggantikan fluida kerja siklus organiknya.

2 PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK DAN DATABASE PENDUKUNG

Perangkat lunak simulator panas bumi dikembangkan untuk menyimulasikan berbagai kemungkinan modifikasi siklus yang dapat memberikan kenaikan efisiensi termal yang berarti. Perangkat lunak simulator panas bumi juga dapat dilengkapi dengan 17 jenis fluida. Metode perhitungan yang digunakan dalam database dijelaskan pada paper [7,8]. Sifat termodinamika udara dihitung dari persamaan tingkat keadaan yang dikembangkan Lemmon et al. [9] dan sifat-sifat air dihitung langsung dari persamaan tingkat keadaan of Saul dan Wagner [10]. Untuk sifat-sifat gas hasil pembakaran dari sistem turbin uap diasumsikan sama dengan sifat riil udara. Untuk fluida kerja organik, sifat-sifat termodinamikanya dihitung dari persamaan tingkat keadaan termodinamika baik dari model yang dihasilkan grup riset penulis [10-17] yang telah

dipublikasi pada jurnal nasional dan internasional, disamping juga paper-paper peneliti lain dari jurnal internasional [7,8,18].

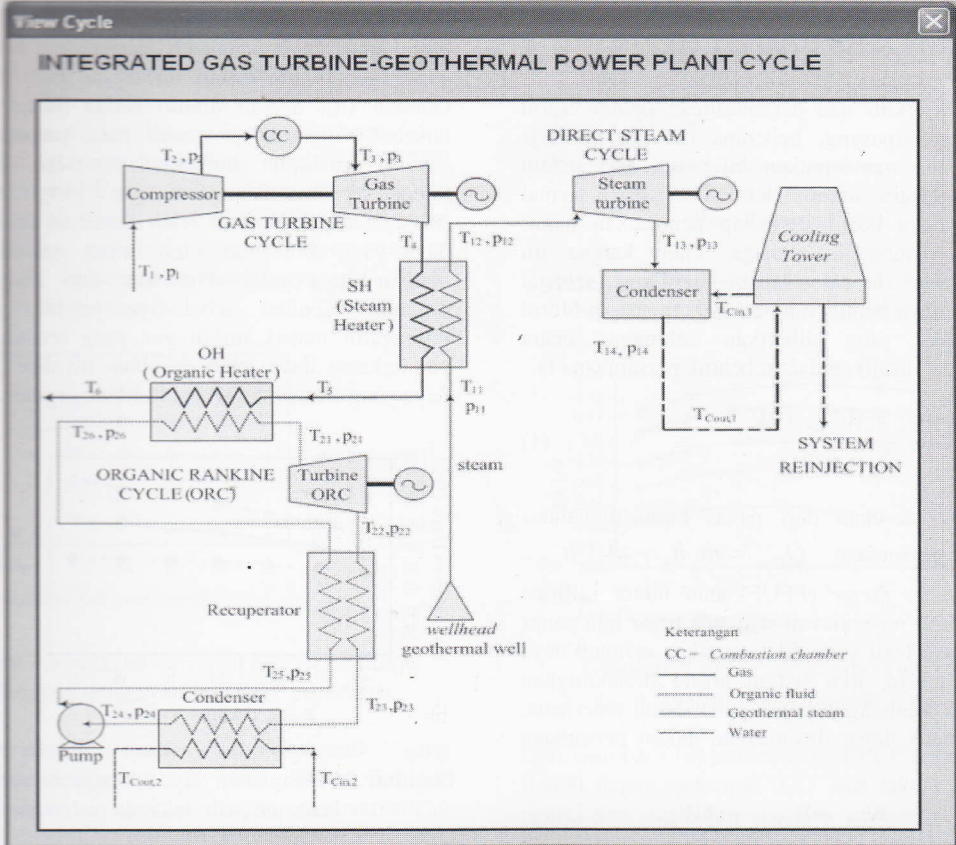
Dari berbagai sistem yang mungkin, yang menjadi perhatian dalam paper ini adalah siklus hibrid sebagaimana gambar skematika dan data masukan yang dibutuhkan diperlihatkan masing-masing pada Gambar (1) dan (2). Tampilan ini muncul dari bantuan perangkat lunak *Geothermal Thermodynamic Simulator* yang telah berhasil dikembangkan untuk mempermudah analisis. Siklus hibrid ini dapat diakses memilih siklus *Geothermal Hybrid Cycle* pada menu *ORC and Gas Turbine*.

3 DATA DAN ASUMSI

Data-data yang digunakan dalam simulasi diambil dari berbagai literatur yang berhubungan, data desain pembangkit listrik tenaga panas (PLTP) bumi Kamojang, dan data yang bersumber dari asumsi yang diambil. Data-data untuk siklus turbin gas adalah temperatur lingkungan 20°C, tekanan lingkungan 1 bar, nilai kalori bahan bakar gas alam (*Fuel Heating Value*) 43000 kJ/kg, penurunan tekanan pada ruang bakar 0%, efisiensi pembakaran 95%, efisiensi isentropik kompresor 85%, efisiensi isentropik turbin gas 80%, dan temperatur gas keluar menuju lingkungan 110°C. Data-data utama siklus uap panas bumi meliputi tekanan uap panas bumi 6,48 bar, temperatur uap panas bumi 161,9°C, *Non Condensable gas* (NCG) 0%, tekanan kondensor 0,1 bar, dan efisiensi isentropik turbin uap 86,12%. Sedangkan data-data siklus Rankine organik adalah fluida kerja organik R-134a, tekanan masuk turbin organik 20 bar, temperatur masuk turbin organik 150°C, efisiensi isentropik turbin 85%, efisiensi isentropik pompa 85%, efektivitas *recuperator* 80%, temperatur kondensor 30°C, kerugian tekanan pada *recuperator*, kondensor dan *organic heater* diabaikan.

Data lainnya adalah laju aliran massa uap panas bumi 105,1286 kg/s dan efisiensi generator 96,85 %. Batasan-batasan dan asumsi lainnya dalam simulasi adalah temperatur uap panas bumi masuk turbin harus lebih besar dari temperatur jenuh tekanan uap panas bumi, temperatur uap keluar *steam heater* harus lebih rendah dari temperatur gas masuk *steam heater*, temperatur masuk turbin fluida organik harus lebih rendah dari temperatur gas keluar *steam heater*, dan tekanan masuk turbin organik harus lebih rendah dari tekanan kritisnya.

Data-data pembangkit panas bumi Kamojang yang terpasang mengacu pada kondisi desain pembangkit panas bumi Kamojang pada beban puncak (100%). Uap yang dihasilkan oleh sumur panas bumi digunakan secara langsung untuk menghasilkan listrik, dengan data-data tingkat keadaan masuk turbin 6,5 bar dan 161,9°C, tingkat keadaan keluar turbin 0,1 bar, dan total laju aliran massa panas bumi 105,1286 kg/s, serta daya keluaran turbin adalah 55 MW.



Gambar 1 Skematik siklus hibrid

GEOTHERMAL HYBRID CYCLE

Design Temperature of Inlet Turbine	1100	[°C]	Fluid Type :	Pure Fluid
Design Pressure Ratio	16		Working Fluid :	R-600
Relative Humidity	60	[%]	Selected EOS :	Miyamoto and Watanabe 2000
Environment Temperature	30	[°C]	Pressure Inlet Turbine	2 [MPa]
Environment Pressure	0.1	[MPa]	Temperature Inlet Turbine	250 [°C]
Fuel Heating Value	43000	[kJ/kg]	Isentropic Efficiency of Turbine	80 [%]
Temperature Inlet Turbine	1100	[°C]	Isentropic Efficiency of Pump	85 [%]
Combustion Efficiency	98	[%]	Recuperator Effectiveness	80 [%]
Isentropic Efficiency of Compressor	85	[%]	Recuperator Pressure Drop	0.1 [%]
Isentropic Efficiency of Turbine	80	[%]	Condenser Temperature	40 [°C]
Temperature Gas Out of Steam Heater	250	[°C]	Condenser Pressure Drop	0.2 [%]
Stack Gas Temperature	110	[°C]	Economiser Pressure Drop	0.1 [%]
Combustor Pressure Drop	0.02	[%]		
Pressure Geothermal	0.648	[MPa]	Steam Mass Flow Rate	105.1286 [kg/s]
Geothermal Temperature	161.9	[°C]	Generator Efficiency	96.85 [%]
Non Condensable Gas	0	[%]		
Superheated Steam Temperatur	550	[°C]		
Condenser Pressure	0.01	[MPa]		
Isentropic Efficiency of Turbine	86.12	[%]		
Steam Heater Pressure Drop	0.1	[%]		
Reinjected Water Temperature	25	[°C]		

RESULTS

Overall Efficiency	32.6199	[%]
Fossil Fuel Utility Factor	0.520498	
Overall Power	151.737	[MW]

Gambar 2 Layar dialog pemasukan data

4 INDIKATOR KINERJA SIKLUS

Dalam analisis siklus dan perbandingan sistem hibrid dengan sistem terpasang, beberapa indikator kinerja digunakan untuk mendapatkan informasi dari sistem secara real. Secara umum definisi efisiensi termal adalah rasio daya bersih terhadap pemasukan panas pada sistem pembangkit tenaga. Oleh karena itu efisiensi sistem hibrid dapat diartikan sebagai perbandingan daya bersih yang dihasilkan sistem hibrid terhadap panas yang diberikan sehingga secara matematis dapat disajikan dalam bentuk persamaan (1).

$$\eta = \frac{W_{GT} + W_{ORC} + W'_{ST}}{Q_{GT} + Q_{Geo}} \quad (1)$$

dimana panas masukan dari panas bumi dievaluasi berdasarkan persamaan $Q_{Geo} = \dot{m}_g h_g - \dot{m}_{rein} h_{rein}$.

Fossil fuel utility factor (FFUF) atau faktor utilisasi bahan bakar fosil menyatakan seberapa besar laju panas dari bahan bakar fosil yang dikonversikan menjadi daya pada sistem hibrid, jika sistem hibrid dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik panas bumi sederhana. Secara matematis dapat dirumuskan dalam persamaan (2).

$$FFUF = \frac{W_{GT} + W_{ORC} + \Delta W_{ST}}{Q_{GT}} \quad (2)$$

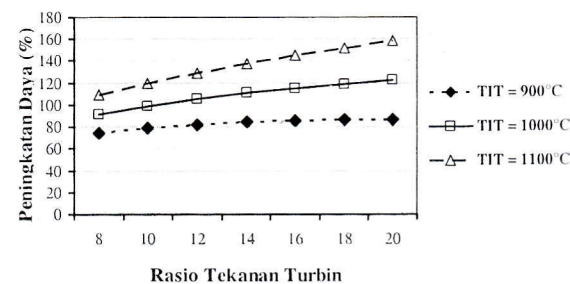
dimana $\Delta W_{ST} = W'_{ST} - W^0_{ST}$, W'_{ST} adalah daya bersih sistem pembangkit listrik panas bumi pada sistem hibrid, dan W^0_{ST} adalah daya bersih standar yang dihasilkan sistem panas bumi sebelum digabung menjadi sistem hibrid.

5 ANALISIS AND DISKUSI KINERJA SIKLUS

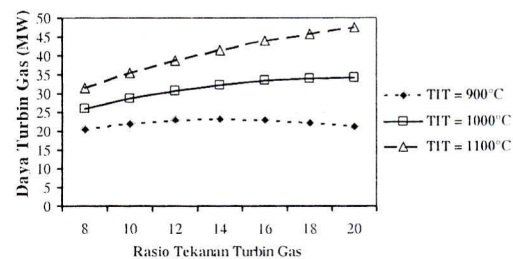
Kinerja siklus hibrid dianalisis dengan data-data, batasan, dan asumsi yang sama seperti data dan asumsi yang dipaparkan sebelumnya. Analisis kinerja ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan yang dapat dihasilkan apabila siklus Rankine yang dioperasikan saat ini dimodifikasi menjadi siklus hibrid. Asumsi tambahan dalam analisis ini adalah batas temperatur maksimal turbin uap ialah 250°C. Atas dasar tujuan itu, analisis dilakukan pada beberapa masuk turbin pada sistem turbin gas, yaitu 900°C, 1000°C, dan 1100°C pada rasio tekanan mulai dari 8 sampai 20.

Dari hasil analisis termodinamika yang telah dilakukan, temperatur gas keluar *steam heater* ditetapkan sebesar 350°C, temperatur uap keluar *steam heater* sebesar 250°C, tekanan masuk turbin organik 3,5 MPa, dan temperatur masuk turbin organik 340°C. Gambar (3) menunjukkan pengaruh rasio tekanan turbin gas terhadap peningkatan daya total sistem, sedang Gambar (4) memperlihatkan daya turbin gas dan Gambar (5)

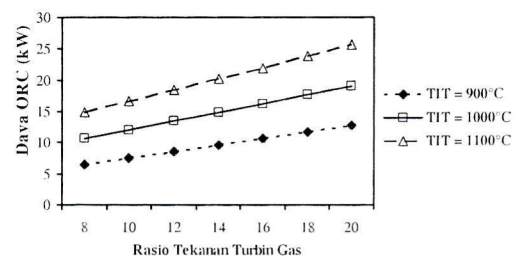
menunjukkan daya turbin organik rasio tekanan turbin gas. Untuk peningkatan efisiensi sistem hibrid dengan variasi temperatur masuk turbin gas diperlihatkan pada Gambar (6). Secara umum kedua parameter operasi tersebut sangat berpengaruh pada parameter kinerja sistem, walaupun hubungannya tidak linier. Pada temperatur masuk turbin gas yang lebih tinggi peningkatan daya total lebih dominan dihasilkan dari daya yang dihasilkan oleh turbin gas dibandingkan dengan daya yang dihasilkan dari siklus Rankine organik. Kondisi sebaliknya terjadi, yaitu pada temperatur masuk turbin gas yang rendah prosentase peningkatan daya lebih dominan itu dipengaruhi oleh daya yang dihasilkan siklus Rankine organik.



Gambar 3 Peningkatan daya total siklus hibrid terhadap berbagai rasio tekanan turbin gas.



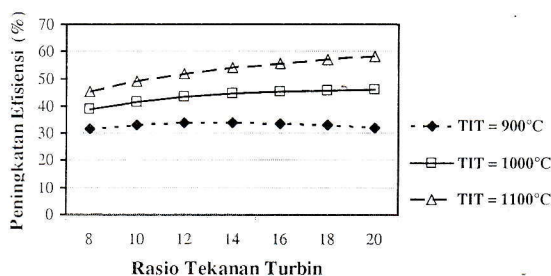
Gambar 4 Daya turbin gas terhadap rasio tekanan turbin gas



Gambar 5 Daya netto ORC pada berbagai rasio tekanan turbin gas dan TIT turbin gas

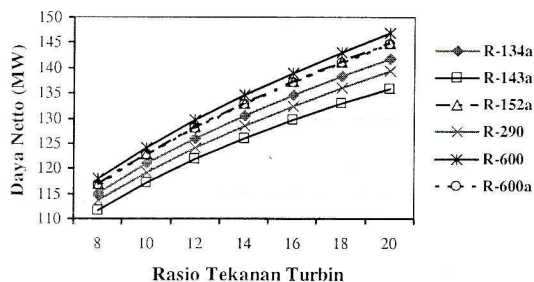
Peningkatan daya yang dihasilkan siklus Rankine pada TIT turbin gas sebesar 1100°C lebih tinggi dibandingkan dengan yang dihasilkan pada TIT 1000°C dan 900°C. Daya netto siklus hibrid yang dihasilkan pada TIT 1100°C dan rasio tekanan 20 ialah sebesar 141,54 MW dan peningkatan daya yang terjadi jika siklus hibrid dibandingkan dengan daya siklus PLT

sederhana ialah 157,88%. Efisiensi siklus hibrid saat TIT turbin gas 1100°C dan rasio tekanan 20 ialah 28,73% serta peningkatan efisiensi yang terjadi bila dibandingkan dengan efisiensi siklus PLTP sederhana ialah 58,17%. Namun kondisi optimum sistem hibrid tidak bisa hanya dilihat dari peningkatan efisiensi dan daya. Kondisi optimum harus berdasarkan nilai FFUF terbesar karena FFUF merupakan parameter terpenting pada siklus hibrid. Untuk mencari FFUF yang tertinggi perlu dilakukan simulasi dengan memvariasikan parameter yang berpengaruh diantaranya jenis fluida kerja siklus Rankine organik.

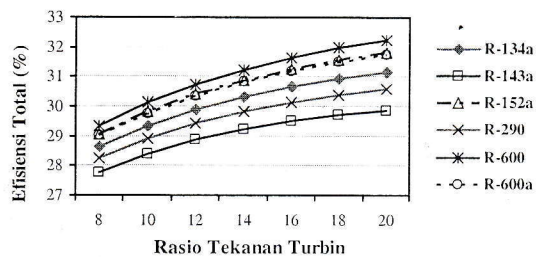


Gambar 6 Peningkatan efisiensi bila siklus hibrid dibandingkan dengan siklus PLTP sederhana

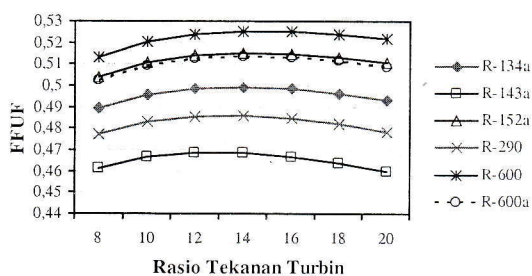
Untuk mengetahui fluida kerja organik yang menghasilkan kinerja terbaik pada siklus Rankine organik, simulasi dilakukan dengan memvariasikan jenis fluida kerja siklus Rankine organik. Kondisi yang digunakan untuk simulasi tersebut ialah temperatur gas masuk turbin 1100°C, temperatur gas keluar *steam heater* 350°C, temperatur uap keluar *steam heater* 250°C, tekanan masuk turbin organik 35 bar, temperatur masuk turbin organik 340°C, rasio tekanan masuk turbin gas divariasikan dari 8 sampai 20. Sedang fluida kerja yang dibandingkan adalah R-134a (standar), R-143a, R-152a, R-290, R-600, R-600a. Pengaruh jenis fluida kerja yang digunakan pada siklus organik terhadap kinerja siklus hibrid diperlihatkan pada Gambar (7, 8 dan 9). Fluida kerja yang menghasilkan daya, efisiensi, dan nilai FFUF yang terbesar adalah fluida kerja R-600, dan yang terendah adalah R-143a. Hasil-hasil ini menegaskan bahwa penggantian fluida kerja dari R-134a (standar) dengan R-600 memungkinkan bagi siklus hibrid untuk menghasilkan kinerja yang optimum.



Gambar 7 Daya total siklus hibrid terhadap rasio tekanan turbin gas

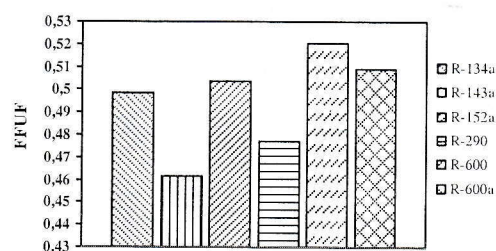


Gambar 8 Efisiensi siklus hibrid terhadap berbagai rasio tekanan turbin gas dan fluida kerja ORC



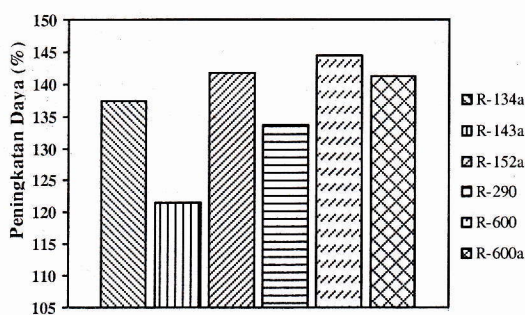
Gambar 9 FFUF siklus hibrid terhadap berbagai rasio tekanan turbin gas dan fluida kerja ORC

Dari Gambar (10) terlihat nilai FFUF untuk fluida kerja R-600 dapat mencapai 0,53 saat siklus menghasilkan peningkatan daya dan efisiensi maksimum berdasarkan data-data yang digunakan untuk simulasi. Nilai FFUF terendah dihasilkan siklus saat menggunakan fluida kerja R-143a sebagai fluida kerja organik, yaitu sebesar 0,47.

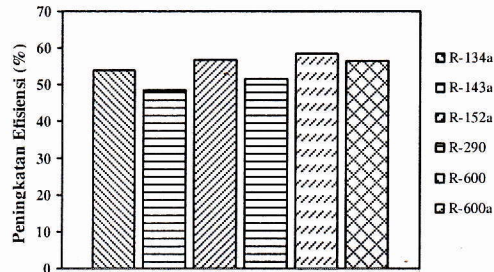


Gambar 10 FFUF maksimum siklus hibrid pada berbagai jenis fluida kerja ORC

Prosentase peningkatan daya dan efisiensi tertinggi untuk kondisi optimal masing-masing jenis fluida terhadap sistem pembangkit daya dengan pemanfaatan panas bumi secara langsung disajikan pada Gambar (11). Dari hasil ini terlihat R-600 dapat menghasilkan peningkatan daya dan efisiensi tertinggi yakni masing-masing sebesar 144,56% dan 58,61%. Peningkatan daya dan efisiensi yang paling kecil adalah R-143a yaitu 121,45% dan 48,46%. Gambar (12) memperlihatkan peningkatan efisiensi siklus hibrid jika dibandingkan dengan siklus PLTP sederhana.



Gambar 11 Peningkatan daya pada optimum siklus hibrid pada berbagai jenis fluida kerja ORC



Gambar 12 Peningkatan efisiensi siklus hibrid optimum saat TIT turbin gas 1100°C

Hasil-hasil ini semua memberikan suatu konfirmasi bahwa siklus hibrid yang merupakan gabungan antara PLTP dan PLTGU memberikan hasil yang menguntungkan dilihat dari efisiensi konversi energi. Dibandingkan dengan PLTGU yang banyak beroperasi dengan efisiensi termal di bawah 50%, pada sistem hibrid ini menghasilkan FFUF 52%. Bila penyesuaian data seperti efisiensi turbin uap yang lebih baik dari apa yang terpasang pada PLTP, akan dapat meningkatkan efisiensi lebih baik lagi. Untuk sistem PLTP umumnya efisiensi turbin yang lebih rendah dipilih untuk menghindari kebasahan uap keluaran turbin uap tidak terlalu tinggi. Lagi pula, kemajuan teknologi turbin dan ruang bakar yang sudah dapat mencapai 1300°C akan memberi kontribusi dalam peningkatan kinerja pada sistem hibrid ini.

6 KESIMPULAN

Dari perbandingan kinerja siklus hibrid terhadap siklus Rankine standar yang digunakan pada kondisi pembangkit panas bumi Kamojang, peningkatan daya optimum diperoleh pada temperatur masuk turbin gas 1100°C dan rasio tekanan turbin gas 14. Daya yang dihasilkan siklus Rankine saat ini memungkinkan untuk ditingkatkan sebesar 137,38% dan efisiensi dinaikkan sebesar 53,95% untuk fluida kerja organik R-134a. Nilai FFUF pada peningkatan kondisi ini sebesar 0,50. Dari analisis perbandingan fluida kerja organik ternyata fluida R-600 memberikan peningkatan daya, efisiensi dan FFUF yang terbesar. Dengan menggunakan fluida

organik R-600 daya siklus Rankine standar memungkinkan untuk ditingkatkan sebesar 144,56% dari sebelumnya, peningkatan efisiensi meningkat sebesar 56,61% dari sebelumnya dan nilai FFUF sebesar 0,52.

Nomenklatur

Simbol:

BBM: bahan bakar minyak
 FFUF: fossil fuel utility factor
 NCG: non condensable gas
 Q: panas
 T: temperatur
 TIT: gas turbine inlet temperature of hot gas
 W: daya

Subskrip:

GT: gas turbine
 Geo: geothermal
 ST: steam turbine
 ORC: organic Rankine cycle
 g: fase gas
 rein: reinjeksi

Superskrip:

: setelah modifikasi
 0 : sebelum modifikasi

REFERENSI

1. T. Dartanto, BBM, Kebijakan Energi, Subsidi, dan Kemiskinan di Indonesia, *Inovasi*, 5:17, November, 2005.
2. N. Saptadji, Sumber daya Panas Bumi: Energi Andalan yang Masih Tertinggalkan, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB (http://www.dim.esdm.go.id/makalah/2-%20ITB_Nenny%20M%20S.pdf), diakses 23 September 2006).
3. G. W. Hutterer, The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000, *Geothermics*, 30, 1-27, 2001 (http://iga.igg.cnr.it/geoworld/pdf/Hutterer_geothermics.pdf), diakses 6 Oktober 2006).
4. G. Bidini, U. Desideri, F. D. Maria, A. Baldacci, R. Papale, dan F. Sabatelli, Optimization of An Integrated Gas Turbine-Geothermal Power Plant, *Energy Convs. Mgmt*, 39, 16-18, 1945-1956, 1998.
5. W. Nowak, A. A. Stachel, dan A. Borsukiewics-Gozdur, Possibilities of Implementation of Absorption Heat Pump in Realization of the Clausius-Rankine Cycle in Geothermal Power Station, *Applied Thermal Engineering*, 28, 335-340, 2008.
6. *Chena Geothermal Power Plant*, 2007, (<http://www.yourownpower.com/power/#other%20applications>), diakses 23 Agustus 2007).

7. D. Phommavongsa, I M. Astina, P. S. Darmanto, dan H. Sato, State of Art on Implementation of Thermodynamic Model for Providing Thermodynamic Property Database, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*. P. 105-110, Bali, Indonesia, 21-22 November, 2005.
8. I M. Astina, *Development of Fundamental Equations of State for Thermodynamic Properties of HFC Refrigerants*, Ph.D. Dissertation, Keio University, Japan, 2003.
9. E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, S.G. Penoncello dan D.G. Friend, Thermodynamic Properties of Air and Mixture of Nitrogen, Argon and Oxygen From 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 29(3): 331-385, 2000.
10. A. Saul dan W. Wagner, A Fundamental Equation for Water Covering the Range from the Melting Line to 1273 K at Pressures up to 25000 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 18 (4): 1537-1564, 1989.
11. C. Sarin, *Development of Thermodynamic Equation of State for Alternative Refrigerants R-600 and R-600a*, Tesis Magister, Teknik Mesin FTI ITB, 2006.
12. J. Fitriansyah, *Pengembangan Persamaan Dasar Tingkat Keadaan Sifat-Sifat Termodinamika untuk Propana*, Tugas Sarjana, Teknik Mesin FTI ITB, 2006.
13. I M. Astina dan H. Sato, A Rational Helmholtz Fundamental Equation of State for Difluoromethane with an Intermolecular Potential Background, *International J. Thermophysics*, 24(4), 963-990, 2003.
14. I M. Astina dan H. Sato, A Fundamental Equation of State for 1,1,1,2- Tetrafluoroethane with Intermolecular Potential Energy Background and Reliable Ideal-Gas Properties, *Fluid Phase Equilibria*, 221, 103-111, 2004.
15. I M. Astina dan H. Sato, A Rigorous Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase 1,1-Difluoroethane (R-152a), *International J. Thermophysics*, 25(6), 1713-1733, 2004.
16. I M. Astina dan H. Sato, A Rational Fundamental Equation of State for Pentafluoroethane with Theoretical and Experimental Bases, *International J. Thermophysics*, 25(1), 113-131, 2004.
17. C. Sarin, I M. Astina, P. S. Darmanto, dan H. Sato, Thermodynamic Property Model for Wide Fluid Phase n-Butane, *Jurnal Teknik Mesin* 22(2): 44-54, 2007.
18. E. W. Lemmon dan R. T. Jacobsen, An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a) for Temperatures from 161 to 450 K and Pressures up to 50 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 29(4): 521 - 552, 2000.