

Analisis Termodinamika Pemanfaatan Fluida Brine Panas Bumi Menggunakan Siklus Rankine Organik 125 kW

Oktasio Fahlevi

Pusat Pengembangan SDM Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi

INFORMASI NASKAH

Diterima : 8 November 2023
Direvisi : 17 November 2023
Disetujui : 25 November 2023
Terbit : 25 November 2023

Email korespondensi:
oktasio@esdm.go.id

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/mz/2023-2/544>

ABSTRAK

Salah satu output dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi yang karakteristik reservoirnya didominasi cair adalah fluida brine yang akan diinjeksi lagi menuju reservoir. Namun temperature fluida brine masih cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai sumber panas pada sistem SRO / siklus rankine organik. Disamping itu, fluida brine mempunyai kandungan silika yang dapat mempengaruhi proses scaling sehingga penurunan temperature fluida brine haruslah dijaga agar tidak terjadi proses scaling. GE Clean Cycle 125 kW merupakan teknologi yang dapat digunakan untuk pemanfaatan waste heat recovery fluida brine. Pada fluida brine, temperature masuk evaporator pada sistem siklus rankine organik sebesar 150°C dengan laju massa alir 63 kg/s, akan keluar melalui pre heater sebesar 146,39°C. Sedangkan Fluida kerja R-245fa mempunyai laju massa alir sebesar 4,3 kg/s bekerja secara sistem tertutup. Potensi energi termal yang dapat diberikan ke dalam sistem SRO sebesar 138,26 kW dengan temperature reservoir 250°C dan net efisiensi sistem SRO GE Clean cycle 125 kW dapat menghasilkan 11,65%.

Kata kunci: Siklus Rankine Organik, GE Clean Cycle 125 kW, Termodinamika

ABSTRACT

One of the outputs from a Geothermal Power Plant whose reservoir characteristics are predominantly liquid is brine fluid which will be injected again into the reservoir. However, the temperature of the brine fluid is still quite high and can be used as a heat source in organic Rankine cycle systems. Apart from that, brine fluid contains silica which can affect the scaling process so that the temperature of the brine fluid must be reduced so that the scaling process does not occur. GE Clean Cycle 125 kW is a technology that can be used to utilize waste heat recovery brine fluid. In brine fluid, the evaporator inlet temperature in the organic Rankine cycle system is 150°C with a mass flow rate of 63 kg/s, which will exit through the pre heater at 146.39°C. Meanwhile, the R-245fa working fluid has a mass flow rate of 4,3 kg/s, working in a closed system. The potential thermal energy that can be provided to the SRO system is 138,26 kW with a reservoir temperature of 250°C and the net efficiency of the GE Clean cycle SRO system of 125 kW can produce 11,65%.

Keywords: *Organic Rankine Cycle, GE Clean Cycle 125 kW, Thermodynamics*

PENDAHULUAN

Energi panas bumi di Indonesia umumnya memiliki reservoir dengan tipe dominasi cair dan mempunyai entalpi medium hingga tinggi, sehingga dibutuhkan separator untuk memisahkan fluida uap dengan fluida cair pada tingkat keadaan tertentu. Fluida cair keluaran separator disebut dengan brine. Fluida brine di beberapa sumur di Indonesia biasanya memiliki temperatur yang masih tinggi (di bawah 200°C) sehingga pada level temperatur tersebut masih bisa dimanfaatkan menjadi energi listrik (Neny,2009).

Temperatur air brine yang tinggi ini dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan SRO atau siklus rankine organik yang menggunakan fluida organik sebagai fluida kerja. Jika dimanfaatkan dengan konsep waste heat recovery, tidak cocok menggunakan siklus rankine konvensional (Hettiarachchi,2007). Siklus rankine organik merupakan teknologi yang mampu melakukan heat recovery dengan menggunakan fluida kerja dengan temperatur rendah. Selain itu, teknologi siklus rankine organik mempunyai keunggulan dalam persyaratan pemeliharaannya (Wei D, 2007). Pemilihan fluida kerja juga menjadi faktor penentu dalam efisiensi dan optimasi sistem (Al-Sulaiman, 2011). Pada sistem Siklus rankine organik, penggunaan IHX / internal heat exchanger juga mampu meningkatkan efisiensi dari sistem SRO tersebut (Wei L,2011).

Selain pemilihan teknologi siklus rankine organik, sumber panas yang berasal dari fluida brine panas bumi juga menjadi factor operasi pada sistem SRO. Fluida organik dipanaskan oleh fluida brine panas bumi melalui penukar panas di sistem SRO pada tingkat keadaan tertentu.

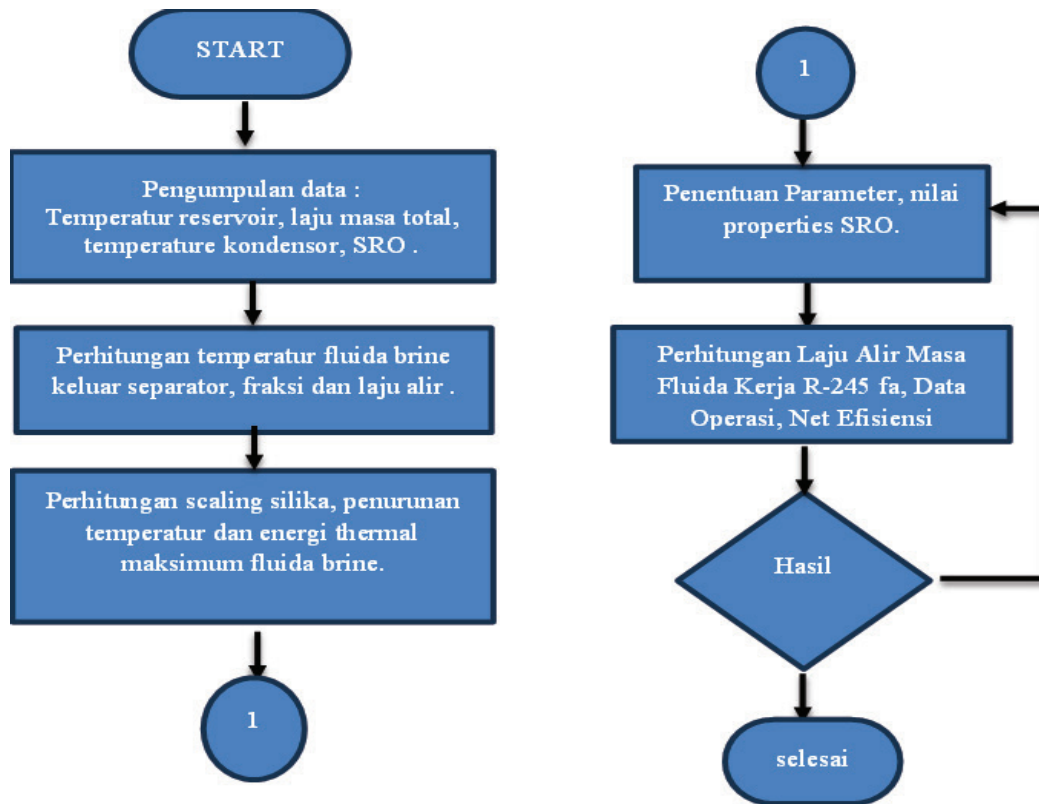
Ketika proses perpindahan panas pada penukar panas, temperatur air brine akan menurun. Hal yang harus diperhatikan pada keadaan tersebut adalah kandungan silika amorphous pada air brine.

Pada keadaan ini, akan terjadi proses scaling (kerak) pada tube yang dilalui oleh air brine. Scaling sangat mengganggu kegiatan operasi karena dapat memperkecil diameter dalam tube dan meningkatkan pressure drop pada tube pada penukar panas. Faktor lain yang mempengaruhi pembentukan scale adalah besarnya laju alir fluida yang diproduksi (Vetter, 1983).

Terdapat beberapa teknologi siklus Rankine organik untuk memanfaatkan energi panas pada air brine menjadi energi listrik. Salah satunya menggunakan produk GE Clean Cycle yang menggunakan R245fa sebagai fluida organik pada siklusnya. R245fa dipanaskan oleh air brine melalui preheater dan evaporator hingga mencapai uap jenuh, setelah itu dilewatkan menuju turbin. Energi putaran pada turbin akan diubah menjadi energi listrik melalui generator. R245fa keluaran turbin akan diarahkan menuju kondensor untuk dikondensasi hingga mencapai cair jenuhnya.

Tujuan dari penulisan studi ini adalah melakukan analisis termodinamika dalam pemanfaatan fluida brine PLTP dengan menggunakan teknologi siklus

rankine organik 125 kW dimana mengambil studi asus pada suatu lapangan panas bumi.



Gambar 1. Diagram Alir Penulisan Artikel

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini sesuai dengan kaidah hukum termodinamika pertama termasuk juga analisis pengukuran kandungan silica yang terdapat dari fluida brine menggunakan formulasi keteknikan dan beberapa asumsi – asumsi juga digunakan untuk memudahkan dalam menentukan hasil dari penulisan artikel ini. Perangkat lunak REFROP 9.1 digunakan dalam analisis termodinamika ini pada setiap kondisi / state nya.

A. Pemodelan Termodinamika.

Dalam artikel ini, dibutuhkan nilai properties dan asumsi – asumsi untuk menghasilkan hasil perhitungan siklus termodinamika pada siklus rankine organik. Penulis telah menentukan parameter, properties serta asumsi – asumsi

yang akan digunakan dalam melakukan analisis termodinamika sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter Input Data

Parameter Input	Nilai / Keterangan
Fluida Brine	Pure Water / Air Murni
	Sistem diasumsikan steady state atau kondisi tunak. (Moran et.al. 2014)
	Sistem Rankine Organik menggunakan Fluida Kerja R-245 fa dan tidak ada fouling faktor
	Perubahan energi potensial dan kinetic diabaikan pada setiap sistem. (Moran et.al. 2014)
	Tidak ada <i>heat loss</i> . sistem berifat adibatis. (Li et al. 2013)
	Temperatur Reservoir sebesar 250°C

Kualitas Uap di Reservoir 0 (bersifat dominasi cair)

Laju Masa Total 80 kg/s

Jenis PLTP Penguapan Tingkat 1

Temperatur fluida kondensator 50°C

Siklus Rankine Organik menggunakan GE Clean Cycle 125 kW dengan Daya Thermal Masukan 980 kW (Gross)

Temperatur Evaporasi R245fa sebesar 130°C. (ASHRAE Handbook,2009)

Pinch temperature evaporator 15-20°C

Temperatur Kondensasi R245fa sebesar 36°C. (GE Clean Cycle)

Pinch temperatur kondensator > 5°C

Pinch temperatur recuperator / IHX > 10°C

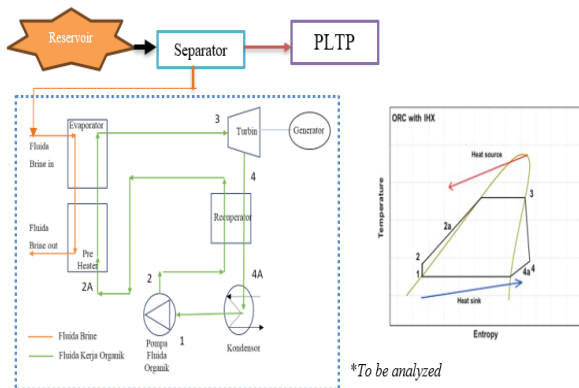
Efisiensi isentropic turbin 75%. (DiPippo 2016)

Efisiensi isentropic pompa 70%. (DiPippo 2016)

Efisiensi generator 90%. (GE Power and Water Distribution)

B. Skematik Diagram SRO GE Clean Cycle 125 kW.

Pemanfaatan fluida brine PLTP menggunakan siklus rankine organik. Skematik diagram menggunakan data dari produk GE Clean Cycle 125 kW sebagai berikut :



Gambar 2. a. Skematik Diagram SRO GE Clean Cycle 125 kW b. Temperatur- Entropy chart dengan recuperator/IHX

GE Clean Cycle merupakan salah satu modul teknologi yang dapat digunakan untuk menggerakkan fluida organik pada organik Rankine cycle. Siklus ini dapat digunakan untuk memanfaatkan energi panas air brine menjadi energi

listrik. Modul ini dapat menghasilkan energi listrik dari 50 kW hingga 250 kW tergantung temperatur sumber panas dan temperatur kondensator pada siklus di GE Clean Cycle tersebut. GE Clean Cycle menggunakan R-245fa sebagai fluida organiknya. Pada gambar 2 menunjukkan sumber panas dari fluida brine masuk kedalam internal heat exchanger / panukar panas, evaporator dan preheater untuk memindahkan energi dari sumber panas menjadi energi panas pada fluida organik, turbin dan generator untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan recuperator untuk menaikan temperatur fluida organik sebelum masuk preheater dan kondensator berfungsi untuk proses kondensasi fluida organik.

C. Potensi Energi Termal dari Fluida Brine

Temperatur fluida brine pada separator diperlukan untuk menentukan besar energi termal yang mampu diberikan oleh fluida brine kedalam penukar panas di SRO.

$$T_{sep} = (T_{reservoir} + T_{kondensator}) / 2 \text{ (Dippipo)}$$

Maka didapatkan temperatur fluida brine saat keluar separator sebesar 150°C.

Energi termal maksimum yang dapat ditransfer oleh air brine ke fluida organik adalah sebesar $Q_{maks} = m_{brine} * C_p * (T_{in} \text{ Evaporator} - T_{maks} \text{ penurunan})$

Sehingga diperoleh energi termal maksimum yang dapat di transfer oleh fluida brine sebesar 1382,6 kW. Nilai ini masih masuk kedalam daya masukan siklus rankine organik GE Clean Cycle 125 kW dimana membutuhkan daya termal sebesar 980 kW (GE Power and Water Distribution).

D. Parameter Input untuk operasi siklus rankine organik.

Pada temperature fluida brine di separator yaitu 150°C, didapatkan besar tekanan operasi pada separator pada temperatur tersebut adalah 0,476 MPa dengan nilai entalpi cair jenuh 632,25 kJ/kg dan entalpi uap jenuh sebesar 2745,92 kJ/kg. sebelumnya, pada temperatur reservoir 250°C didapatkan entalpi cair jenuh sebesar 1085,69 kJ/kg. Sehingga kualitas uap pada separator dapat dihitung menggunakan rumus :

$$x = \frac{\text{entalpi reservoir} - \text{entalpi separator cair jenuh}}{\text{entalpi separator uap jenuh} - \text{entalpi cair jenuh}}$$

Sehingga diperoleh kualitas uap pada keluaran separator sebesar 21% & dan kualitas cair sebesar 79%. Laju masa fluida brine dapat dihitung dengan menggunakan hukum kekekalan massa, sehingga didapat laju massa fluida brine sebesar 62,9 kg/s.

E. Batas Penurunan Temperatur Fluida Brine PLTP.

Agar tidak terjadi pengendapat silika pada heat exchanger (Evaporator dan Pre heater) pada siklus rankine organik, diperlukan penurunan temperature fluida brine yang nilai silica saturation index / SSI < 1.

$$S(T') = \frac{Q_T}{1 - X}$$

$$Q_T = 7,0281 + (-0,228748)T + (1,20057 \times 10^{-2})T^2 + (-1,50598 \times 10^{-4})T^3 + (1,42552 \times 10^{-6})T^4 + (-6,0991 \times 10^{-9})T^5 + (1,34828 \times 10^{-11})T^6 + (-1,29355 \times 10^{-14})T^7$$

$$\text{Log } C = 4,52 - \frac{731}{T}$$

$$\text{SSI} = \frac{S(T')}{C}$$

$$T_{maks} = \frac{731}{4,52 - \log(C)}$$

Supaya tidak memungkinkan terjadinya pengendapan silika pada heat exchanger maka temperatur maksimum penurunan fluida brine yang dapat diturunkan adalah sebesar 144,9°C dari 150°C.

F. Laju Alir Massa Fluida Kerja R-245 fa

Berdasarkan spesifikasi GE Clean Cycle, daya listrik yang dapat dibangkitkan adalah sebesar 125 kW (gross). Daya ini merupakan daya keluaran pada generator. Efisiensi generator 90%, maka daya turbin 138,8 kW.

$$W_{turbin} = m_{ref} * \eta_{turbin} * (h_3 - h_4s) = m_{ref} * (h_3 - h_4)$$

Dengan *mref* adalah laju alir massa refrigeran R-245fa, *ηturbin* adalah efisiensi turbin, *h3* entalpi masuk turbin, *h4* adalah entalpi R-245fa keluar turbin, dan *h4s* adalah entalpi keluar turbin pada kondisi entropi tetap. Besar *h3* dapat dicari pada

sifat R-245fa pada temperatur 130°C dan kondisi uap jenuh yaitu sebesar 487,7 kJ/kg dengan entropi sebesar *s3* = 1.7997 kJ/kgK. *h4s* merupakan besar entalpi ketika besar entropi keluaran turbin *s4* = *s3* = 1.7997 kJ/kgK dan pada tekanan kondensasi yaitu sebesar 219.07 kPa. Sehingga pada tekanan dan entropi tersebut diperoleh besar *h4s*= 444,71 kJ/kg dengan temperatur sebesar 50,1°C. Efisiensi isentropik turbin diasumsikan sebesar *ηturbin*= 75%. Dengan nilai tersebut diperoleh laju alir massa refrigeran R-245fa sebesar 4,30 kg/s.

Pada sistem siklus rankine organik, kondenser diberikan pendinginan melalui air Sungai yang bersih disekitar PLTP dengan temperature 15-17C. Untuk menentukan laju massa alir air Sungai yang akan masuk ke sistem siklus rankine organik digunakan rumus :

$$m_{airsungai} = \frac{Q_{kondensor}}{c_p * (T_{in} - T_{out})}$$

Sehingga didapatkan laju massa air sungai yang masuk ke sistem SRO sebesar 33,88 kg/s.

Net efisiensi sistem SRO juga dianalisis dengan asumsi tidak memperhitungkan adanya pressure drop pada pre heater dan evaporator dengan rumus :

$$\eta_{net} = \frac{W_{net}}{Q_{thermal\ ORC}} * 100\%$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada hasil penelitian ini didapatkan siklus operasi setiap sistem SRO sebagai berikut :

A. Kondisi Operasi pada Kondensor.

Tabel 2. Data Operasi Kondensor

Kondensor		
Analisis termodinamika	Fluida Kerja R245 fa	Fluida Dingin (Dari Air Sungai)
Temperatur in	50,3°C (uap)	17°C (cair)
Temperatur out	36°C (cair jenuh)	23°C (cair)
Tekanan Operasi	219,07 kPa	101,32 kPa
Laju Massa Alir	4,30 kg/s	33,88 kg/s
Pinch Temperatur	13,3 °C	

Setelah fluida kerja R-245fa keluar dari IHX/recuperator, maka fluida kerja akan dikondensasikan menggunakan kondensor. Besarnya energi termal yang digunakan untuk proses kondensasi sebesar 850,55 kW.

B. Kondisi Operasi pada Pre Heater.

Tabel 3. Data Operasi Pre Heater

Preheater		
Analisis termodinamika	Fluida Brine	Fluida Kerja R245 fa
Temperatur in	148,45°C	45,5°C (cair)
Temperatur out	146,39°C	130°C (cair jenuh)
Laju massa alir	63 kg/s	4,30 kg/s
Tekanan Operasi	476 kPa	2.344.2 kPa
Pinch Temperatur	18,45C	

Pada SRO 125 kW dengan besaran energi termal sebesar 980 kW, berlaku hukum kesetimbangan energi : $Q_{brine} = Q_{evaporator} + Q_{preheater}$.

Maka diperoleh energi termal pada preheater sebesar 561,09 kW.

C. Kondisi Operasi pada Evaporator.

Tabel 4. Data Operasi Evaporator

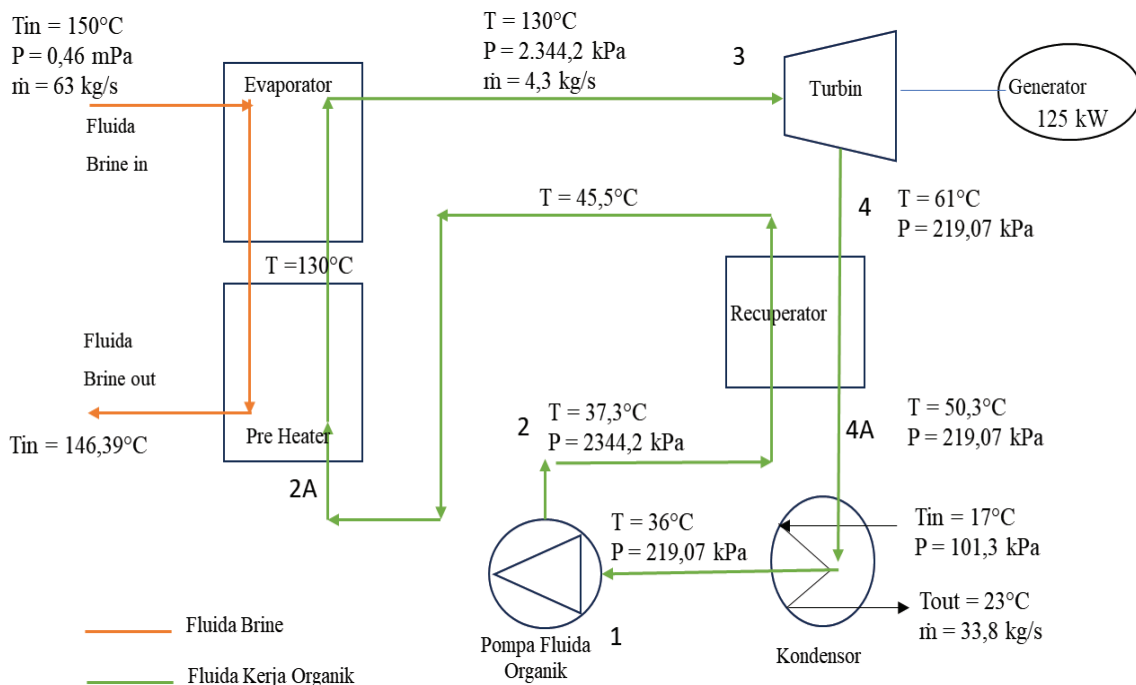
Evaporator		
Analisis termodinamika	Fluida Brine	Fluida Kerja R245 fa
Temperatur in	150°C	130°C (cair jenuh)
Temperatur out	148,45°C	130°C (uap jenuh)
Laju massa alir	63 kg/s	4,30 kg/s
Tekanan Operasi	476 kPa	2.344.2 kPa
Pinch Temperatur	18,45C	

Dikarenakan temperatur evaporasi fluida kerja sebesar 130°C dengan kondisi uap jenuh, maka didapatkan besarnya energi termal pada evaporator sebesar 418,91 kW.

D. Net Efisiensi SRO 125 kW

Adapun net efisiensi yang didapatkan dari sistem SRO sebesar 11,65%. Hasil efisiensi ini masuk dalam range efisiensi PLTP dari hasil kajian Sadiq J. Zarouk mengenai efisiensi pembangkit listrik panas bumi (Zarrouk,2014).

Secara keseluruhan, Skematik Sistem Operasi Siklus Rankin Organik 125 kW GE Clean Cycle dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Siklus lengkap parameter operasi GE 125 kW Clean Cycle

KESIMPULAN

Pemanfaatan Fluida brine dengan temperatur 150°C dan laju alir massa 63 kg/s memiliki potensi energi termal yang dapat dimanfaatkan sebesar 1382,6 kW pada PLTP dominasi cair dengan temperatur reservoir 250°C dan laju massa total 80 kg/s. Pada evaporator mempunyai besaran energi termal sebesar 418,91 kW, sedangkan pada Pre heater dibutuhkan 561,09 kW. Pada kondensor mempunyai besaran energi termal sebesar 850,55 kW. Dalam siklus rankin organik GE Clean cycle 125 kW dengan parameter input operasi yang telah diperhitungkan sebelumnya tersebut mempunyai efisiensi termal 11,65 %.

SARAN

Penulisan artikel ini merupakan studi awal dalam melakukan analisis termodinamika pada PLTP dengan siklus rankine organik dengan memanfaatkan waste heat recovery. Optimasi terkait jenis penukar panas yang berdasarkan TEMA yang akan digunakan dan kajian keekonomian dapat menjadi saran kedepan untuk kesempurnaan penulisan ini. Data air brine yang digunakan seharusnya menggunakan data dari beberapa lapangan, sehingga kesalahan akibat asumsi Fluida brine sebagai air murni dapat diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Kern, D.Q. (1965). *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- Saptadji, N. M. (2009). *Teknik Panas Bumi*. Departemen Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung.
- Moran, M.J., Saphiro, H.N., Boettner, D.D., & Bailey, M.B. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Wiley.
- DiPippo, R. (2016). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies, and Environmental Impact* (4th ed.). *Comprehensive Renewable Energy*.
- Li, G. (2016). *Organic Rankine Cycle Performance Evaluation and Thermo-economic Assessment with Various Applications Part I: Energy and Exergy Performance Evaluation*.
- Incopera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., & Lavine, A.S. (2013). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Li, X., Zhang, Q., & Li, X. (2013). A Kalina cycle with ejector. *Energy*, 54, 212–219. Elsevier Ltd.
- GE Power & Water Distributed Power. (2014). *Clean Cycle II R-Series Technical Specification*.
- Predovan, M. et al. (2021). Thermodynamic analysis of a 17.5 MW geothermal power plant operating with a binary organic Rankine cycle.
- Wei, D., Lu, X., Lu, Z., & Ju, Z. (2007). Performance analysis and optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 48, 1113–1119.
- Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Ouyang, M., Zhao, Y., & Mu, Q. (2011). Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery. *Energy*, 36, 3406–3418.
- Al-Sulaiman, F.A., Hamdullahpur, F., & Dincer, I. Greenhouse gas emission and exergy assessments of an integrated organic Rankine cycle with a biomass combustor for combined cooling, heating, and power production. *Applied*.
- Zarrouk, S. J., Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, 51, 142–156.
- Hettiarachchi, H.D.M., et al. (2007). Optimum Design Criteria for an Organic Rankine Cycle Using Low-Temperature Geothermal Heat Sources. *Energy*, 32, 1698–1706.
- Wei, L., Zhang, Y., Mu, Y., Yang, X., & Chen, X. (2011). Efficiency improving strategies of low temperature heat conversion systems using organic Rankine cycles: an overview. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33, 869–878.
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*.
- Vetter. (1983). *Solid Waste Problem in Geothermal Operations*. Paper presented at the SPE California Regional Meeting, Ventura, California, March

Lampiran :

GE Power & Water
Distributed Power

Clean Cycle II R-Series Technical Specification

Product description

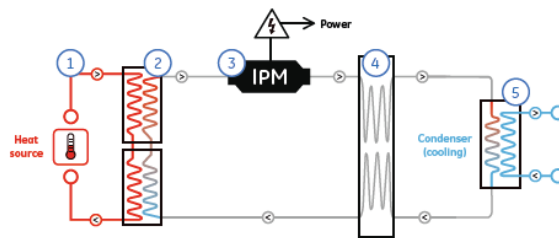
GE's Clean Cycle® II heat-to-power generator is a compact, modular system that converts waste heat – from an array of heat sources – into power. The closed-loop process requires no additional fuel, produces no additional emissions, and delivers base-load power that may be used onsite or sold to the grid.

GE's Clean Cycle II R-Series includes a recuperator that results in an overall more efficient cycle by transferring some of the thermal energy from the vapor leaving the turbine expander to the fluid that is being pumped to the heat source.



How it works

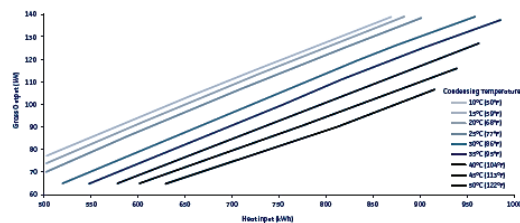
GE's Clean Cycle II unit generates power in a process called the Organic Rankine Cycle (ORC). The process is similar to the steam cycle, except that the ORC uses a working fluid (in place of water) with a lower boiling point, enabling access to a greater range of heat sources.



GE Power & Water
Distributed Power

Performance data

GE's Clean Cycle II heat-to-power generator automatically creates the maximum power possible based on the heat transferred to the ORC and the condensing temperature. The temperature of the waste heat delivered to the Clean Cycle II unit can vary by source; the chart below assumes it is 155°C (311°F).



System parameters

Maximum gross output from generator	kW	140±5%
Maximum grid output from power electronics**	kW	115±5%
Minimum heat source fluid temperature	155°C / 311°F	

** Includes PE and working fluid pump losses. Does not include parasitic losses from balance of plant.

Electrical output

Frequency	Hz	60	50
Voltage	V	480	400
Power factor	-	1.0	1.0
Load current (full gross)	A	168	202
Peak starting current	A	53	64

Scope of supply

Core components delivered	
The Clean Cycle II skid (see back page for details)	Standard
Skid mounted condenser	Optional
R245fa working fluid	Optional
Engineering services	
Heat source heat exchanger	Spec and/or supply
High pressure hot water system	Spec and/or supply
Custom condenser and system design	Spec and/or supply
Overall system design	Optional
Commissioning	Optional

System design

Gross electrical output	50 - 140 kW
Working fluid	R245fa (benign, non-ozone depleting)
Power electronics	Built in inverter – matches AC grid power
Electrical output	50 or 60Hz AC 3-phase power
Dimensions	384.0 x 121.9 x 217.4 cm 151.2 x 48.0 x 85.6 in
Weight (not filled)	3,548kg (7,822 lbs)

Thermophysical Properties of Refrigerants

30.25

Refrigerant 245fa (1,1,1,3,3-Pentafluoropropane) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

Temp., °C	Pressure, MPa	Density, kg/m ³ Liquid	Volume, m ³ /kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c _p , kJ/(kg·K)		c _p /c _v	Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp., °C
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-60	0.00127	1548.7	10.380	126.08	361.82	0.6949	1.8009	1.200	0.701	1.101	1041	120.3	2026.	7.36	115.5	9.08	24.67	-60
-50	0.00281	1525.2	4.9038	138.12	368.68	0.7501	1.7834	1.208	0.725	1.099	994	122.7	1501.	7.71	111.9	9.27	23.47	-50
-40	0.00572	1501.6	2.5079	150.24	375.67	0.8033	1.7702	1.218	0.751	1.098	948	125.0	1174.	8.06	108.5	9.54	22.26	-40
-30	0.01085	1477.7	1.3726	162.48	382.76	0.8547	1.7606	1.229	0.778	1.098	902	127.1	951.2	8.40	105.2	9.89	21.03	-30
-20	0.01937	1453.6	0.79638	174.84	389.94	0.9044	1.7541	1.242	0.806	1.099	859	129.0	790.1	8.75	102.1	10.30	19.78	-20
-10	0.03277	1429.0	0.48586	187.34	397.18	0.9528	1.7502	1.257	0.837	1.100	815	130.7	668.3	9.09	99.0	10.77	18.52	-10
0	0.05292	1404.0	0.30955	200.00	404.47	1.0000	1.7486	1.274	0.868	1.103	773	132.1	573.2	9.42	95.9	11.31	17.25	0
2	0.05795	1398.9	0.28419	202.55	405.93	1.0093	1.7484	1.277	0.875	1.104	765	132.3	556.7	9.49	95.3	11.43	16.99	2
4	0.06336	1393.8	0.26129	205.11	407.39	1.0186	1.7484	1.281	0.881	1.104	756	132.5	540.8	9.56	94.7	11.55	16.74	4
6	0.06916	1388.7	0.24057	207.68	408.86	1.0278	1.7484	1.284	0.888	1.105	748	132.8	525.6	9.62	94.0	11.67	16.48	6
8	0.07538	1383.5	0.22180	210.25	410.32	1.0369	1.7485	1.288	0.895	1.106	740	133.0	511.0	9.69	93.4	11.79	16.22	8
10	0.08204	1378.3	0.20477	212.84	411.79	1.0461	1.7487	1.292	0.901	1.107	731	133.2	497.0	9.76	92.8	11.91	15.97	10
12	0.08917	1373.1	0.18929	215.43	413.25	1.0552	1.7489	1.296	0.908	1.108	723	133.4	483.5	9.82	92.2	12.04	15.71	12
14	0.09677	1367.9	0.17520	218.02	414.72	1.0642	1.7492	1.299	0.915	1.109	715	133.5	470.6	9.89	91.5	12.17	15.46	14
15.14 ^b	0.10133	1364.9	0.16774	219.51	415.55	1.0694	1.7494	1.302	0.919	1.109	710	133.6	463.4	9.93	91.2	12.24	15.31	15.14
16	0.10488	1362.6	0.16236	220.63	416.18	1.0733	1.7496	1.303	0.922	1.110	707	133.7	458.1	9.96	90.9	12.30	15.20	16
18	0.11352	1357.3	0.15063	223.24	417.65	1.0822	1.7500	1.307	0.929	1.111	698	133.8	446.1	10.02	90.3	12.43	14.94	18
20	0.12270	1352.0	0.13992	225.86	419.12	1.0912	1.7504	1.312	0.936	1.112	690	133.9	434.5	10.09	89.7	12.56	14.69	20
22	0.13247	1346.6	0.13012	228.49	420.58	1.1001	1.7509	1.316	0.943	1.113	682	134.1	423.3	10.16	89.0	12.70	14.43	22
24	0.14283	1341.3	0.12113	231.13	422.04	1.1090	1.7515	1.320	0.950	1.114	674	134.1	412.5	10.22	88.4	12.84	14.17	24
26	0.15383	1335.8	0.11288	233.78	423.51	1.1178	1.7521	1.324	0.958	1.115	666	134.2	402.1	10.29	87.8	12.98	13.92	26
28	0.16547	1330.4	0.10530	236.44	424.97	1.1267	1.7527	1.329	0.965	1.117	657	134.3	392.0	10.36	87.2	13.12	13.66	28
30	0.17779	1324.9	0.09833	239.10	426.43	1.1355	1.7534	1.333	0.973	1.118	649	134.3	382.3	10.42	86.5	13.27	13.40	30
32	0.19081	1319.3	0.09191	241.78	427.89	1.1442	1.7541	1.338	0.980	1.120	641	134.4	372.8	10.49	85.9	13.42	13.15	32
34	0.20456	1313.7	0.08599	244.46	429.35	1.1529	1.7549	1.342	0.988	1.121	633	134.4	363.7	10.56	85.3	13.57	12.89	34
36	0.21907	1308.1	0.08053	247.15	430.81	1.1617	1.7557	1.347	0.996	1.123	625	134.4	354.8	10.62	84.6	13.72	12.63	36
38	0.23436	1302.4	0.07548	249.86	432.26	1.1703	1.7566	1.352	1.003	1.125	617	134.4	346.2	10.69	84.0	13.87	12.38	38
40	0.25046	1296.7	0.07080	252.57	433.71	1.1790	1.7574	1.357	1.011	1.126	609	134.3	337.9	10.76	83.4	14.02	12.12	40
42	0.26741	1291.0	0.06647	255.29	435.16	1.1876	1.7583	1.362	1.019	1.128	600	134.3	329.8	10.83	82.7	14.18	11.87	42
44	0.28522	1285.2	0.06246	258.03	436.61	1.1962	1.7593	1.367	1.028	1.130	592	134.2	321.9	10.89	82.1	14.34	11.61	44
46	0.30394	1279.3	0.05873	260.77	438.05	1.2048	1.7603	1.373	1.036	1.132	584	134.1	314.3	10.96	81.4	14.50	11.36	46
48	0.32358	1273.4	0.05527	263.52	439.49	1.2133	1.7613	1.378	1.044	1.135	576	134.0	306.9	11.03	80.8	14.66	11.10	48
50	0.34417	1267.4	0.05205	266.29	440.93	1.2219	1.7623	1.383	1.053	1.137	568	133.8	299.7	11.10	80.2	14.83	10.85	50
52	0.36576	1261.4	0.04905	269.07	442.36	1.2304	1.7633	1.389	1.061	1.139	560	133.7	292.6	11.17	79.5	15.00	10.60	52
54	0.38836	1255.3	0.04625	271.85	443.78	1.2389	1.7644	1.395	1.070	1.142	552	133.5	285.8	11.24	78.9	15.17	10.34	54
56	0.41201	1249.2	0.04365	274.65	445.21	1.2474	1.7655	1.401	1.079	1.145	544	133.3	279.1	11.32	78.2	15.34	10.09	56
58	0.43674	1243.0	0.04122	277.46	446.62	1.2558	1.7666	1.407	1.088	1.147	536	133.1	272.6	11.39	77.6	15.51	9.84	58
60	0.46259	1236.8	0.03894	280.29	448.04	1.2642	1.7678	1.413	1.098	1.150	527	132.8	266.2	11.46	76.9	15.69	9.59	60
62	0.48957	1230.4	0.03682	283.12	449.44	1.2727	1.7689	1.419	1.107	1.153	519	132.6	260.1	11.54	76.3	15.86	9.34	62
64	0.51773	1224.1	0.03482	285.97	450.84	1.2811	1.7701	1.426	1.117	1.157	511	132.3	254.0	11.61	75.6	16.04	9.09	64
66	0.54710	1217.6	0.03296	288.83	452.23	1.2894	1.7713	1.433	1.127	1.160	503	132.0	248.1	11.69	75.0	16.23	8.84	66
68	0.57771	1211.1	0.03121	291.70	453.62	1.2978	1.7724	1.439	1.137	1.164	495	131.6	242.3	11.77	74.4	16.41	8.59	68
70	0.60960	1204.4	0.02957	294.59	455.00	1.3062	1.7736	1.447	1.147	1.168	487	131.3	236.7	11.85	73.7	16.60	8.35	70
72	0.64279	1197.8	0.02803	297.49	456.36	1.3145	1.7748	1.454	1.158	1.172	479	130.9	231.2	11.93	73.1	16.79	8.10	72
74	0.67732	1191.0	0.02658	300.40	457.72	1.3229	1.7760	1.461	1.169	1.176	470	130.5	225.8	12.01	72.4	16.98	7.85	74
76	0.71323	1184.1	0.02521	303.33	459.08	1.3312	1.7773	1.469	1.180	1.181	462	130.0	220.5	12.10	71.8	17.18	7.61	76
78	0.75055	1177.2	0.02393	306.28	460.42	1.3395	1.7785	1.477	1.192	1.186	454	129.5	215.3	12.18	71.2	17.38	7.37	78
80	0.78931	1170.1	0.02272	309.24	461.75	1.3478	1.7797	1.486	1.204	1.191	446	129.0	210.2	12.27	70.5	17.58	7.13	80
82	0.82956	1163.0	0.02158	312.21	463.06	1.3561	1.7809	1.494	1.217	1.196	437	128.5	205.3	12.37	69.9	17.79	6.88	82
84	0.87132	1155.7	0.02050	315.20	464.37	1.3644	1.7821	1.503	1.230	1.202	429	127.9	200.4	12.46	69.3	18.00	6.65	84
86	0.91464	1148.4	0.01949	318.21	465.66	1.3727	1.7833	1.512	1.243	1.209	421	127.4	195.6	12.56	68.6	18.22	6.41	86
88	0.95955	1140.9	0.01853	321.24	466.94	1.3810	1.7845	1.522	1.257	1.215	412	126.7	190.9	12.66	68.0	18.44	6.17	88
90	1.0061	1133.3	0.01762	324.28	468.20	1.3893	1.7856	1.532	1.272	1.223	404	126.1	186.3	12.76	67.4	18.66	5.93	90
92	1.0543	1125.6	0.01676	327.34	469.45	1.3976	1.7868	1.543	1.287	1.230	396	125.4	181.8	12.87	66.7	18.89	5.70	92
94	1.1042	1117.7	0.01594	330.42	470.68	1.4059	1.7879	1.554	1.303	1.239	387	124.7	177.3	12.98	66.1	19.13	5.47	94
96	1.1559	1109.7	0.01517	333.52	471.89	1.4142	1.7890	1.565	1.320	1.247	379	123.9	172.9	13.10	65.5	19.38	5.24	96
98	1.2093	1101.6	0.01444	336.64	473.09	1.4225	1.7901	1.577	1.337	1.257	370	123.1	168.6	13.22	64.9	19.63	5.01	98
100	1.2646	1093.3	0.01374	339.78	474.26	1.4308	1.7912	1.590	1.356	1.267	362	122.3	164.3	13.35	64.3	19.89	4.78	100
105	1.4110	1071.8	0.01215	347.74	477.09	1.4516	1.7936	1.625	1.408	1.297	340	120.0	154.0	13.70	62.8	20.59	4.22	105
110	1.5698	1049.1	0.01074	355.85	479.74	1.4725	1.7959	1.667	1.469	1.335	319	117.4	143.9	14.09	61.3	21.36	3.68	110
115	1.7417	1025.0	0.00949	364.13	482.19	1.4936	1.7977	1.716	1.544	1.383	296	114.6	134.2	14.54				

