

INTISARI

Indonesia memiliki potensi energi panas bumi sebesar 23,9 GW yang belum dimanfaatkan secara optimal. Di sisi lain, pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) jenis *single-flash* menghasilkan panas buang (*waste heat*) berupa *brine* dari separator yang direinjeksikan ke dalam reservoir tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Jika panas buang *brine* ini dapat dimanfaatkan, maka efisiensi energi PLTP dan pemanfaatan potensi energi panas bumi dapat ditingkatkan untuk mendukung transisi energi. PLTP Ulubelu di Provinsi Lampung mereinjeksikan 2.577 t/h *brine* dengan temperatur 166°C dan tekanan 7,38 bar_a. *Brine* dengan kondisi tersebut masih memiliki energi panas buang yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui siklus daya termal. Sehingga, terdapat peluang pengembangan siklus daya termal untuk *waste heat recovery* (WHR) *brine* pada PLTP Ulubelu.

Siklus Rankine organik (ORC) dan siklus Brayton CO₂ superkritis (SCBC) merupakan siklus daya termal yang dapat digunakan untuk WHR. Siklus ORC sudah cukup matang untuk aplikasi WHR pada suhu rendah hingga sedang. Sedangkan, siklus SCBC yang masih dalam tahap pengembangan, berpotensi untuk bersaing dengan ORC untuk aplikasi WHR. Siklus SCBC memiliki beberapa keunggulan, seperti penggunaan fluida kerja CO₂ yang bersifat *inert*, tidak beracun, tidak mudah terbakar dan meledak, GWP bernilai 1. Selain itu, CO₂ di sekitar titik kritisnya (temperatur 31,1°C dan tekanan 73,8 bar_a) memiliki kalor jenis dan densitas yang tinggi sehingga komponen berukuran kompak dapat digunakan.

Oleh sebab itu, penelitian ini melakukan perbandingan termodinamika dan keekonomian dari empat konfigurasi siklus daya: siklus ORC (sederhana dan *recuperative*) dan siklus SCBC (sederhana dan *recuperative*) untuk aplikasi WHR *brine* pada PLTP Ulubelu. Analisis termodinamika terdiri dari empat tahapan utama: (a) permodelan persamaan termodinamika menggunakan perangkat lunak Engineering Equation Solver (EES); (b) perhitungan kondisi operasi dan *rating* komponen utama; (c) perhitungan dan optimisasi daya *output* neto dan efisiensi termal; serta (d) validasi permodelan termodinamika. Selanjutnya, analisis keekonomian terdiri dari dua tahapan utama: (a) permodelan persamaan keekonomian; dan (b) perhitungan *capital expenditure* (CAPEX), *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan periode pengembalian.

Hasil analisis termodinamika menunjukkan bahwa siklus ORC *recuperative* menghasilkan daya *output* neto dan efisiensi termal yang terbesar (masing-masing, yaitu 27.363 kW dan 15,96%) di antara siklus daya yang diteliti. Hasil validasi menunjukkan bahwa terdapat *good agreement* antara nilai efisiensi termal hasil perhitungan dan hasil penelitian lainnya sehingga permodelan termodinamika pada penelitian ini dapat dianggap valid. Selanjutnya, hasil analisis keekonomian menunjukkan bahwa siklus SCBC *recuperative* memiliki performa keekonomian yang paling unggul dengan CAPEX yang terendah (1.404,42 USD/kW-neto), NPV dan IRR yang tertinggi (masing-masing, yaitu 414,7 juta USD dan 29%), serta periode pengembalian yang tercepat (4,83 tahun).

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga panas bumi, siklus Brayton CO₂ superkritis, siklus Rankine organik, *waste heat recovery*

ABSTRACT

Indonesia has a geothermal energy potential of 23.9 GW, which has yet to be utilized optimally. On the other hand, single-flash geothermal power plants (GPP) produce waste heat from the separated brine, which is reinjected into the reservoir without further utilization. If the waste heat of the brine can be utilized, the energy efficiency of GPP and the utilization of geothermal energy potential can be increased to support the energy transition. The Ulubelu GPP in Lampung Province reinjects 2,577 t/h of brine with a temperature of 166°C and a pressure of 7.38 bar_a. Brine under such conditions still has waste heat energy which can be converted into electrical energy through a thermal power cycle. Thus, there is an opportunity to develop a thermal power cycle for brine waste heat recovery (WHR) at the Ulubelu GPP.

The organic Rankine cycle (ORC) and the supercritical CO₂ Brayton cycle (SCBC) are thermal power cycles that can be used for WHR. ORC is a mature technology for WHR applications at low to moderate temperatures. Meanwhile, SCBC, which is still under development, has the potential to compete with ORC for WHR applications at low temperatures. SCBC has several advantages, such as using CO₂ working fluid, which is inert, non-toxic, non-flammable, non-explosive, and has a GWP of 1. Furthermore, CO₂ near its critical point (temperature 31.1°C and pressure 73.9 bar_a) has very high specific heat and density around its critical point, so compact-sized components can be used.

Therefore, this study conducted a thermodynamic and economic comparison of four power cycle configurations: the ORC (simple and recuperative) and the SCBC (simple and recuperative) for WHR brine applications at the Ulubelu GPP. The thermodynamic analysis consists of four main stages: (a) modeling the thermodynamic equation using the Engineering Equation Solver (EES) software; (b) calculation of operating conditions and rating of the cycle's main components, (c) calculation and optimization of net power output and thermal efficiency; and (d) thermodynamic modeling validation. Furthermore, the economic analysis consists of two main stages: (a) modeling the economic equation; and (b) calculation of capital expenditure (CAPEX), net present value (NPV), internal rate of return (IRR), and payback period.

The results of the thermodynamic analysis showed that the recuperative ORC produced the highest net output power and thermal efficiency (27,363 kW and 15.96%, respectively) among the compared power cycles. The validation results show good agreement between the calculated thermal efficiency values and the results of literature studies, so the thermodynamic modeling in this study can be considered valid. Furthermore, the results of the economic analysis show that the recuperative SCBC has the best economic performance with the lowest CAPEX (USD 1,404.42/kW-net), the highest NPV and IRR (USD 414.7 million and 29%, respectively), as well as the shortest payback period (4.83 years).

Keyword: geothermal power plant, supercritical CO₂ Brayton cycle, organic Rankine cycle, waste heat recovery