

Studi Konfigurasi *Organic Rankine Cycle* (ORC) dan Pemilihan Fluida Kerja pada Pembangkit Listrik Geotermal

JOJO HIDAYAT^{1,2}, DANI RUSIRAWAN³

¹Mahasiswa Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Pusat Riset Elektronika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

³Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: jojo001@brin.go.id

ABSTRAK

Energi panas bumi atau geotermal adalah sumber energi bersih sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Geotermal dengan temperatur tinggi telah banyak dieksploitasi sebagai pembangkit tenaga listrik. Geotermal dengan temperatur rendah dan menengah berpotensi besar menjadi pembangkit tenaga listrik menggunakan siklus Rankine organik (*organic Rankine cycle/ORC*), yaitu mengganti air dengan fluida organik yang memiliki titik didih yang lebih rendah. Pada studi ini akan dipaparkan konfigurasi ORC pada geotermal sebagai pembangkit tenaga listrik. Selain itu, pemilihan fluida organik sebagai fluida kerja juga akan dikaji, karena hal ini menentukan performa/unjuk kerja sistem pembangkit daya. Pemilihan fluida kerja harus diperhatikan terkait sifat-sifatnya, seperti titik didih, temperatur dekomposisi dan pengaruhnya terhadap komponen sistem.

Kata kunci: energi, temperatur, tekanan, efisiensi, performa sistem, seri, paralel

ABSTRACT

Geothermal is an alternative clean energy resource to substitute for conventional fossil energy. High-temperature geothermal resources have been harnessed as power generation. However, low-medium temperature geothermal resources also potentially utilize as power generator, through the organic Rankine Cycle (ORC), which replaces water as the working fluid with lower boiling point organic fluid. This study presented the ORC configuration for geothermal application in electricity production. Furthermore, the selection of the working fluid will be discussed, since it plays a key role in the performance of the power generation system. Working fluid selection has to be considered, such as boiling point, decomposition temperature, and its impact on the system components.

Keywords: energy, temperature, pressure, efficiency, system performances, series, parallel

1. PENDAHULUAN

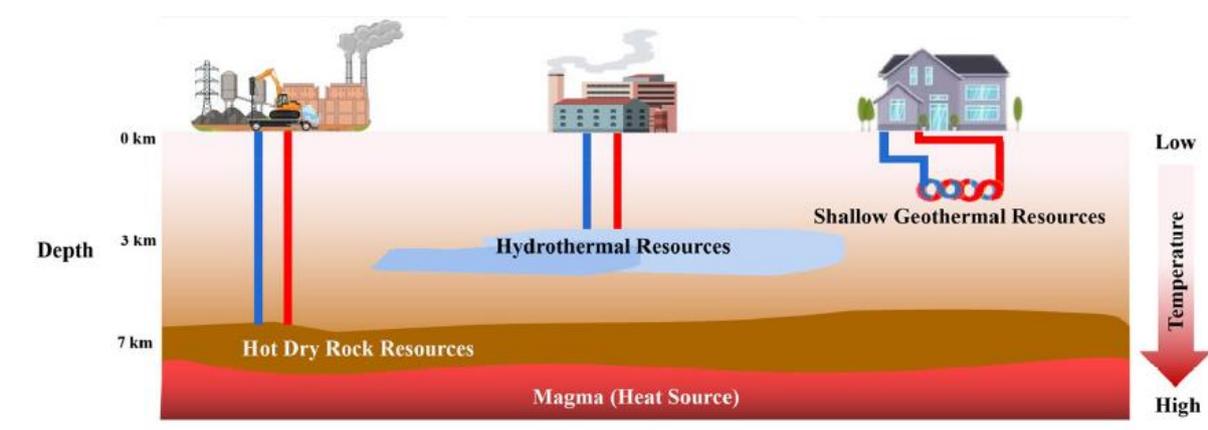
Penggunaan bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) telah mendominasi pemenuhan kebutuhan energi manusia. Akan tetapi, penggunaan bahan bakar fosil menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius, termasuk pemanasan global, polusi udara dan kerusakan lingkungan (**Altun & Kilic, 2020; Cetin et al., 2024; Solano–Olivares et al., 2019**). Di sisi lain, sumber bahan bakar fosil merupakan sumber daya yang terbatas dan tidak terbarukan, sehingga pemanfaatan sumber energi alternatif yang bersih dan terbarukan perlu ditingkatkan, seperti tenaga surya, energi angin, atau energi panas bumi (geotermal).

Di antara sumber energi terbarukan yang lain, energi panas geotermal memiliki beberapa keunggulan, di antaranya sumber daya yang besar, stabil tidak bergantung pada cuaca, dan ramah lingkungan (**Baydar et al., 2023; Y. Wang et al., 2021**). Energi geotermal adalah energi panas yang berasal dari dalam perut bumi yang berpindah ke permukaan dalam bentuk uap panas, gas, atau air panas (**Altun & Kilic, 2020**). Energi panas bumi banyak dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti pembangkit listrik, alat pemanas/pendingin, wisata, atau untuk keperluan industri (**Liu et al., 2023**).

Secara umum, sumber daya geotermal yang dikonversi menjadi energi listrik secara komersial adalah sumber daya dengan temperatur menengah dan tinggi ($>200^{\circ}\text{C}$) melalui uap kering (*dry steam*) atau *flash steam system* (**Lee et al., 2019; Song et al., 2020a**). Oleh karena itu, hanya geotermal yang ada di wilayah tektonik aktif saja yang dapat memanfaatkan panas bumi menjadi pembangkit listrik. Akan tetapi, energi geotermal dengan temperatur rendah dan menengah ($100^{\circ}\text{-}200^{\circ}\text{C}$) dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan siklus Rankine organik (*Organic Rankine Cycle/ORC*) (**Chitgar et al., 2023a; Lee et al., 2019; Song et al., 2020a**). Prinsip kerja ORC pada dasarnya sama dengan siklus turbin uap Rankine. Pada turbin uap Rankine, uap air digunakan sebagai penggerak turbin (fluida kerja), tetapi pada ORC fluida organik digunakan sebagai pengganti air. Fluida organik yang digunakan adalah fluida yang memiliki titik didih pada tekanan dan temperatur yang rendah di bawah titik didih air (**Javanshir & Sarunac, 2017**). Tekanan maksimum operasional pada ORC berada di bawah tekanan fluida siklus Rankine konvensional, sehingga bisa mengurangi biaya peralatan pompa. ORC lebih ekonomis, karena biaya perawatan yang rendah, tidak memerlukan biaya bahan bakar tambahan, dan tidak berdampak besar pada lingkungan. Ada beberapa konfigurasi ORC yang digunakan untuk menghasilkan daya listrik dari energi geotermal. Selain itu penentuan fluida kerja juga menjadi faktor penting terkait dengan konfigurasi ORC yang digunakan. Pada studi ini, akan dikaji konfigurasi ORC dan penentuan fluida kerja pada geotermal untuk pembangkit daya listrik

2. KLASIFIKASI GEOTERMAL

Energi panas bumi merupakan energi panas yang tersimpan di dalam kerak bumi, kemudian energi panas tersebut berpindah ke permukaan bumi secara konveksi. Berdasarkan temperatur kerja atau entalpinya, sumber daya geotermal dapat dikategorikan menjadi empat, yaitu temperatur sangat rendah (*ultra low*), rendah (*low*), menengah (*medium*), dan tinggi (*high*). Temperatur ini juga ditentukan oleh lokasi kedalaman sumber daya dari permukaan bumi. Geotermal dengan temperatur yang sangat rendah, yaitu di bawah 80°C tidak memiliki nilai ekonomi ketika dieksploitasi menjadi pembangkit tenaga listrik, biasanya sumber geotermal dengan temperatur rendah digunakan untuk keperluan wisata dan studi. Klasifikasi sumber daya geotermal ditunjukkan pada Gambar 1 dan terangkum dalam Tabel 1. (L. Wang et al., 2023)



Gambar 1. Klasifikasi sumber daya geotermal, yaitu temperatur rendah, menengah, dan tinggi (L. Wang et al., 2023)

Tabel 1. Klasifikasi sumber daya geotermal (L. Wang et al., 2023)

	Temperatur Tinggi	Temperatur menengah	Temperatur rendah
Pemanfaatan	<ul style="list-style-type: none"> • Pembangkit listrik untuk industri 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembangkit listrik untuk industri 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembangkit listrik • Pertanian, perikanan dan pariwisata
Aksesibilitas	Sulit	Relatif mudah	Mudah
Potensi	Sangat besar	Sedang	Rendah
Distribusi energi listrik	Luas	terbatas	tersebar

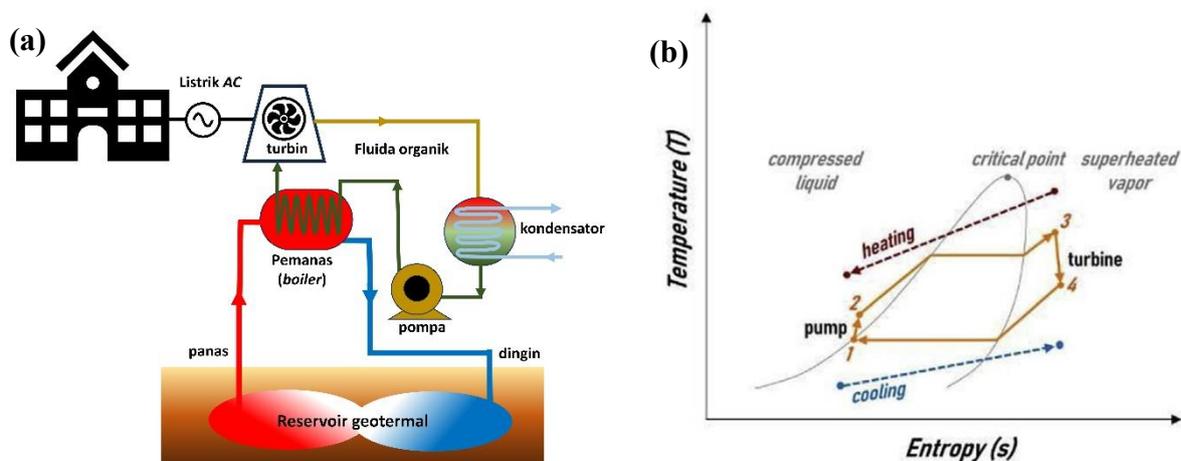
Sumber daya geotermal dengan temperatur tinggi mendapatkan sumber panasnya dari lokasi yang sangat dalam dan dieksploitasi dengan sistem pompa panas (*geothermal heat pump system*). Aksesibilitas sumber daya ini sulit, tetapi memiliki potensi yang besar dan energi listrik yang dihasilkan dapat didistribusikan secara luas.

Geotermal dengan temperatur yang menengah berasal dari kedalaman menengah, dan berada pada lokasi reservoir air sehingga dapat dieksploitasi dengan sistem hidrotermal (*hydrothermal geothermal system*). Potensi sumber daya geotermal temperatur menengah tidak besar dengan aksesibilitas yang relative mudah. Distribusinya terbatas pada wilayah tektonik yang aktif. Di sisi lain, lokasi sumber daya geotermal temperatur rendah berada di kedalaman yang dangkal, dengan aksesibilitas yang mudah.

3. KONFIGURASI ORC PADA GEOTERMAL

Pada dasarnya prinsip kerja dari ORC adalah sama dengan siklus turbin uap Rankine (*Steam Rankine Cycle*) (Altun & Kilic, 2020), tetapi ORC menggunakan fluida organik sebagai fluida kerja karena memiliki titik didih yang lebih rendah daripada air (Javanshir & Sarunac, 2017). Kestabilan termal dari sebagian besar fluida organik ada pada rentang 35⁰-400⁰C, di atas rentang tersebut fluida organik akan terdekomposisi (Keulen et al., 2017). Dengan demikian, ORC dapat digunakan untuk geotermal yang memiliki sumber panas dengan temperatur rendah dan menengah.

Konfigurasi dasar ORC untuk sistem pembangkit daya geotermal dan diagram temperatur terhadap entropi ditunjukkan pada Gambar 2. Konfigurasi dasar ORC adalah konfigurasi yang paling sederhana, terdiri atas empat komponen, yaitu pemanas (*boiler*) untuk menginjeksi panas ke sistem (siklus), perangkat pengekspansi dengan turbin (*expander*) untuk menghasilkan kerja, kondensator sebagai pendingin, dan pompa (Jiménez-García et al., 2023; Loni et al., 2021).



Gambar 2 (a) Konfigurasi dasar ORC terdiri atas pemanas (*boiler*), pengekspansi (*expander*) dengan turbin, kondensator, dan pompa (b) Diagram T-S pada konfigurasi dasar ORC (Lee et al., 2019)

Mekanisme kerja ORC dasar dapat terlihat pada diagram T-Snya. Fluida kerja dalam fasa likuid jenuh (saturasi) dipompa ke pemanas (1-2) untuk selanjutnya dipanaskan sehingga temperaturnya naik dan berubah menjadi fasa uap bertekanan tinggi (2-3). Uap bertekanan tinggi dengan energi mekanik mengalir ke expander menggerakkan turbin menghasilkan energi kinetik (3-4). Turbin yang terhubung dengan generator, selanjutnya menghasilkan energi listrik. Uap yang keluar dari expander memiliki tekanan yang lebih rendah dialirkan ke kondensator agar dingin dan terkondensasi menjadi likuid jenuh (4-1). Fluida organik dalam fasa likuid dipompa kembali ke pemanas sehingga komplet dalam satu siklus

(Jiménez-García et al., 2023; Loni et al., 2021). Konfigurasi dasar ORC dapat menghasilkan energi keluaran sebesar 46,4 kJ ketika dioperasikan pada temperatur kerja 150°C menggunakan fluida organik R1234yf (*hydrofluoroolefin*) **(Zhai et al., 2014)**.

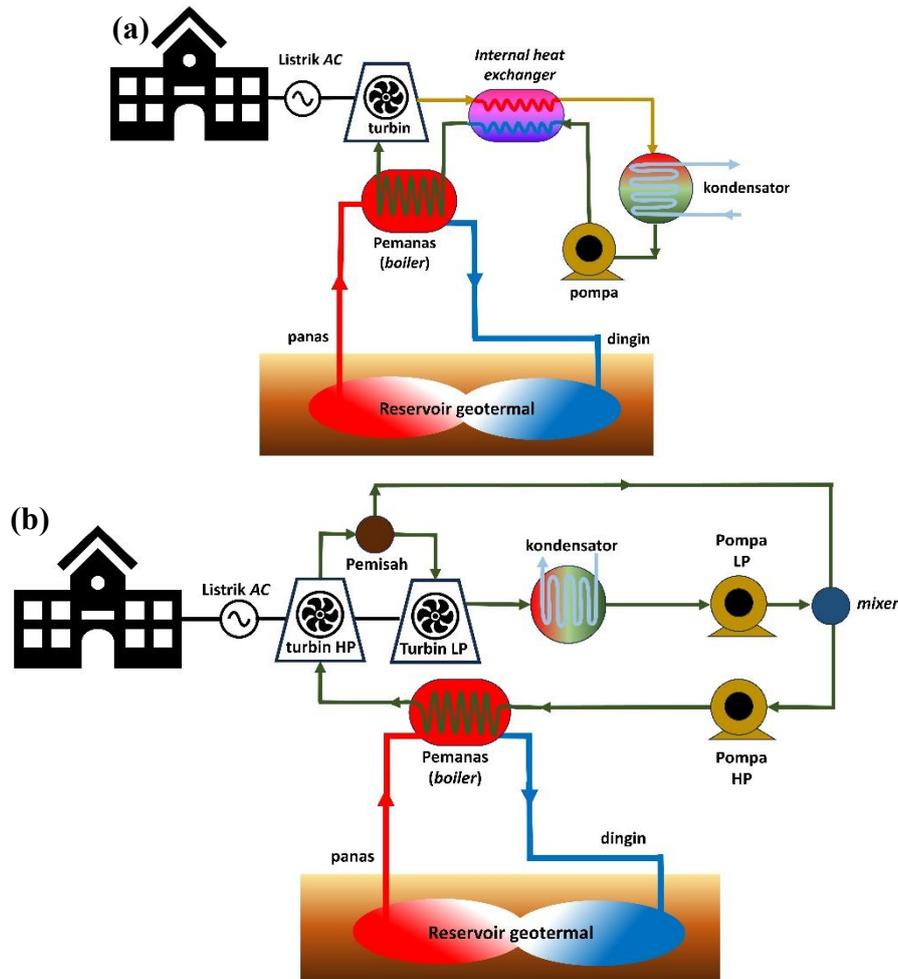
Konfigurasi dasar ORC dapat dimodifikasi untuk meningkatkan performa sistem pembangkit daya. ORC dengan penambahan perangkat pertukaran panas secara internal (*recuperator*) merupakan modifikasi dari ORC dasar, sehingga terjadi pertukaran panas antara fluida keluaran *expander* dan fluida yang akan masuk ke dalam pemanas. seperti yang terlihat pada Gambar 3(a). Konfigurasi ini dikenal dengan *recuperative* ORC **(Lee et al., 2019)**. Pertukaran panas tersebut akan mengurangi beban kerja kondensator dan mengurangi panas yang diperlukan untuk evaporasi di dalam pemanas **(Jiménez-García et al., 2023)**. Dengan demikian, energi yang diperlukan memanaskan dan mendinginkan fluida kerja dapat dikurangi. Keberadaan *heat exchanger* ini juga menurunkan temperatur fluida pendingin pada kondensator, sehingga panas yang dibuang ke lingkungan menjadi lebih rendah.

Superheater perlu ditambahkan ke dalam sistem ORC untuk mencegah uap fluida kerja ada yang menjadi tetesan-tetesan likuid di *expander*. Penambahan ini menjadi penting ketika fluida kerja yang digunakan adalah fluida basah **(Song et al., 2020b)**.

Konfigurasi ORC regeneratif menggunakan dua turbin dan dua pompa, yaitu turbin dan pompa tekanan rendah dan tekanan tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3 (b). Sebagian uap keluaran dari turbin tekanan tinggi (turbin HP) dipisahkan untuk menggerakkan turbin tekanan rendah (turbin LP) dan ada yang dialirkan ke generator (*mixer*). Di generator, fluida dalam fasa uap bertekanan rendah bercampur dengan fluida likuid dari kondensator yang dipompa ke generator oleh pompa tekanan rendah (pompa LP) untuk selanjutnya dijadikan satu dengan fluida kerja hasil kondensasi yang dipompa oleh pompa tekanan rendah (pompa LP). Fluida yang telah bercampur tersebut, kemudian dipompa oleh pompa tekanan tinggi (pompa HP) menuju pemanas **(Lee et al., 2019)**. Dalam hal ini, uap keluaran turbin dimanfaatkan sebagai pemanasan awal likuid fluida kerja, sebaliknya likuid fluida kerja menjadi pendingin uap, sehingga tercapai kondisi saturasi. Pemanfaatan regenerasi ini digunakan untuk meningkatkan efisiensi termal dan meminimalisasi ireversibilitas **(Bina et al., 2017)**.

Sebagian uap dari turbin tekanan tinggi dipisahkan untuk digunakan pemanasan awal (*preheat*) fluida kerja sebelum masuk pompa tekanan tinggi. Dengan memanfaatkan *internal heat exchanger* pada ORC regeneratif, maka energi pemanasan dan pendinginan menjadi lebih rendah. ORC regeneratif yang dilengkapi dengan *recuperator* disebut dengan RR-ORC sistem. Analisa komparatif terhadap empat konfigurasi ORC, yaitu ORC dasar, *recuperative* ORC, *regenerative* ORC, dan RR-ORC menunjukkan bahwa performa energi yang dihasilkan masing-masing konfigurasi adalah 710, 21 kW, 768 kW, 805 kW, dan 825,21 kW **(Nondy & Gogoi, 2021)**. Daya yang dihasilkan oleh ORC regenerative dan *recuperative* berada di antara ORC dasar dan RR-ORC. Hal ini menunjukkan bahwa RR-ORC paling baik dalam menghasilkan daya listrik.

Studi Konfigurasi Organic Rankine Cycle (ORC) dan Pemilihan Fluida Kerja pada Pembangkit Listrik Geotermal



Gambar 3.(a) Konfigurasi *recuperative* ORC dan (b) *regenerative* ORC

Konfigurasi ORC yang menggunakan satu evaporator/pemanas dikenal dengan ORC satu tahap (*single-stage*) atau ORC tekanan tunggal (*single-pressure*) (Jiménez-García et al., 2023). Selain itu, ORC dua tahap (*two-stage*) menggunakan siklus dua tekanan yang berbeda, dengan memanfaatkan panas di dua temperatur yang berbeda (Lee et al., 2019). Kedua siklus tersebut dapat dikonfigurasi secara seri atau paralel. Pada konfigurasi ORC seri, aliran fluida geotermal keluaran dari ORC yang pertama masih memiliki temperatur yang tinggi, sehingga dimanfaatkan dengan menambahkan ORC kedua, sehingga kedua ORC mendapatkan panas dari fluida geotermal. Di sisi lain, pada konfigurasi paralel dua ORC terhubung dalam satu lingkaran. Fluida kerja pada keluaran dari turbin ORC yang pertama masih dapat digunakan untuk mengevaporasi fluida kerja dengan temperatur kritis yang lebih rendah untuk menghasilkan uap sehingga menghasilkan daya dari turbin kedua (Chitgar et al., 2023b). Konfigurasi ORC seri dan paralel ini dapat meningkatkan performa ORC hingga 20% dibandingkan dengan ORC sendirian (Heberle & Brüggemann, 2010). Dalam konfigurasi seri dan paralel pemilihan fluida kerja adalah faktor penting yang paling menentukan performa pembangkit listrik geotermal. Akan tetapi, konfigurasi ORC seri atau paralel juga meningkatkan kompleksitas sistem, energi yang diperlukan oleh sistem, dan biaya operasional, sehingga penentuan konfigurasi yang sesuai untuk sumber geotermal diperlukan analisis yang cermat.

konfigurasi paralel, ORC pertama menggunakan panas geotermal sebagai evaporator, dan pertukaran panas dengan fluida kerja ORC kedua sebagai kondensator. Sebaliknya, panas pada fluida kerja ORC pertama digunakan sebagai evaporator pada fluida kerja ORC kedua melalui pertukaran panas. Di sisi lain, aliran gas natural (LNG) digunakan sebagai kondensator oleh ORC kedua, sehingga energi cryogenic pada LNG dimanfaatkan oleh ORC kedua sebagai pendingin. Selain itu, ada turbin LNG yang ditambahkan sebagai tambahan daya untuk desalinasi air laut dengan memanfaatkan pertukaran panas antara gas natural dengan fluida kerja ORC kedua.

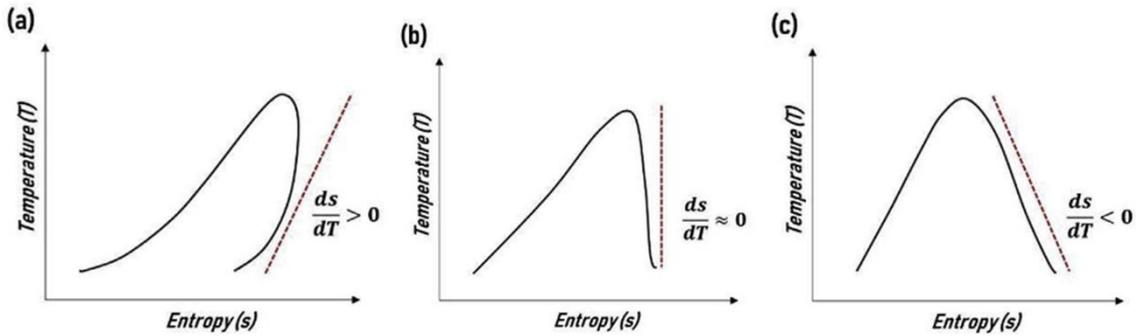
Hasil exergy analisis menunjukkan bahwa ORC dasar menghasilkan daya listrik sebesar 33% dari exergy yang masuk ke dalam ORC dan 24% kembali ke sumur reinjeksi. Sebagian besar exergy yang hilang karena sistem pertukaran panas, akibat besarnya perbedaan temperatur geotermal dan fluida kerja ORC.

Pada konfigurasi ORC seri produksi daya listrik meningkat sekitar 30% , sedangkan konfigurasi paralel berhasil meningkatkan produksi daya listrik hingga 150% dari konfigurasi dasar (**Chitgar et al., 2023b**). Meningkatnya produksi daya listrik secara signifikan pada konfigurasi paralel, tidak hanya disebabkan oleh konfigurasinya, tetapi karena adanya penambahan turbin dari gas alam. Analisa ini belum dapat dikatakan sebagai analisa yang seimbang, karena sistem pendingin menggunakan gas natural hanya ada pada konfigurasi paralel. Hasil kajian ekonomi pada studi tersebut menunjukkan bahwa biaya operasional untuk ORC dasar paling rendah adalah 95,56 USD/jam dengan fluida kerja R1234ze, sedangkan biaya operasional untuk ORC seri dan ORC paralel masing-masing 106,56 USD/jam dan 142,95 dengan fluida kerja amonia-R1234ze dan R1233zd-R290 (**Chitgar et al., 2023b**). Konfigurasi ORC seri dan paralel memiliki biaya operasional yang lebih tinggi daripada ORC dasar, sehingga sistem desalinasi menggunakan panas geotermal sebagai sumber listrik dengan konfigurasi ORC dua-tahap belum memiliki keuntungan ekonomis dibandingkan dengan ORC dasar.

4. PEMILIHAN FLUIDA KERJA

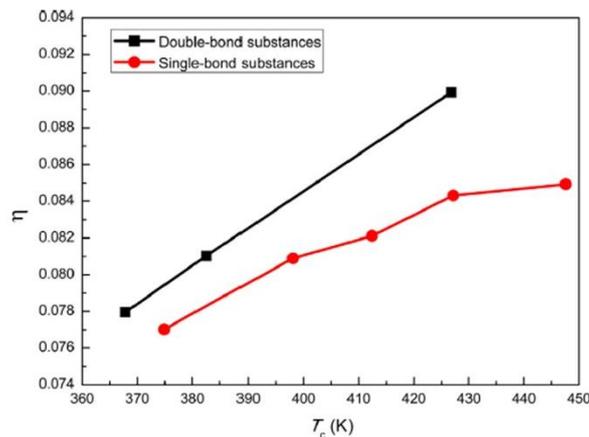
Performa ORC ditentukan oleh dua faktor utama, yaitu temperatur panas sumber dan karakter dari fluida kerjanya. Penentuan fluida kerja yang sesuai memiliki peran penting, karena karakter termofisika fluida mempengaruhi fungsi sistem, aspek finansial, lingkungan, dan keamanan (**Chitgar et al., 2023b**). Kestabilan termal fluida kerja juga perlu diperhatikan, karena fluida organik akan terdekomposisi pada temperatur yang tinggi (di atas 400°C) (**Keulen et al., 2017**). Dekomposisi fluida kerja menyebabkan malfungsi serius pada komponen sistem, kehilangan daya, dan menjadi sumber korosi komponen (**Rajabloo et al., 2017**). Dekomposisi parsial pada fluida kerja akan mempengaruhi karakter termodinamikanya dan performa siklus, sehingga menurunkan daya yang dihasilkan (**Keulen et al., 2017**). Selain itu fluida kerja juga harus ramah lingkungan dan tidak berbahaya bagi kesehatan manusia.

Ada tiga kategori fluida kerja yang digunakan pada sistem ORC, yaitu kering (*dry*), basah (*wet*), dan isentropis (*isentropic*). Ketiga kategori fluida ini dapat dilihat dari kemiringan kurva saturasi pada diagram temperatur-entropi (T-S), sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5. Kemiringan kurva saturasi bervariasi bergantung pada jenis fluida. Fluida kering memiliki kemiringan yang positif, fluida basah dengan kemiringan negatif, dan fluida isentropis memiliki kemiringan mendekati nol (**Lee et al., 2019**). Secara umum, fluida kering dan isentropis digunakan pada ORC, termasuk n-pentana, iso-pentane, atau iso-butana, karena memiliki temperatur didih yang lebih rendah dan berat molekul yang lebih besar daripada air, dan fluida tersebut tidak terkondensasi di dalam turbin yang menimbulkan tetesan embun, sehingga merusak turbin (**Baydar et al., 2023; Chitgar et al., 2023b**).



Gambar 5. Diagram temperatur-entropi (T-S) fluida kerja geotermal (a) fluida kering (*dry*) (b) isentropis (*isentropic*) dan (c) fluida basah (*wet*) diambil dari referensi (Lee et al., 2019)

Struktur molekul berupa ikatan tunggal, ganda, dan siklik telah dianalisa pengaruhnya terhadap performa ORC sistem dengan konfigurasi dasar (Zhai et al., 2014). Hasil analisa efisiensi ditunjukkan oleh Gambar 6. Hasilnya menunjukkan bahwa struktur dengan ikatan kimia ganda atau siklik menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi daripada fluida dengan struktur kimia tunggal (Zhai et al., 2014).



Gambar 6. Efisiensi fluida organik hidrofluorine karbon dengan perbedaan ikatan atom pada temperatur evaporasi 345 K, diambil referensi (Zhai et al., 2014)

Fluida kerja yang biasa digunakan adalah fluida yang tidak mudah meledak, tidak beracun, dan ramah lingkungan. Fluida pada mesin pendingin hidroklorofluorokarbon, seperti R123 (hidroklorofluorokarbon), R113 (hidroklorofluorokarbon), R114 (diklorotetrafluoroetana), R134a (Tetrafluoroetana), R134a (Tetrafluoroetana), R134a (Tetrafluoroetana), R134a (Tetrafluoroetana), dan R245fa (Pentafluoropropana) biasanya digunakan pada sistem ORC (Anderson & Rezaie, 2019).

Untuk ORC sistem dengan konfigurasi seri, fluida organik dengan temperatur kritis tinggi seperti iso-pentane menghasilkan efisiensi tinggi. Konfigurasi ORC paralel, fluida organik dengan titik kritis rendah, seperti R227ea, menghasilkan efisiensi tinggi (Heberle & Brüggemann, 2010; Loni et al., 2021). Hasil optimasi menggunakan *machine learning* menunjukkan bahwa R1233zd (e) menghasilkan efisiensi *exergy* yang paling tinggi sekitar 50,6%, sedangkan amonia memberikan keluaran listrik yang besar untuk konfigurasi dasar sebesar 2,3 MW (Chitgar et al., 2023b). Pada konfigurasi ORC paralel, kombinasi R1233zd (e) dan etana menghasilkan efisiensi paling tinggi (33,70%), dan kombinasi amonia dan R1234ze (z) sesuai untuk konfigurasi seri secara ekonomis, tetapi fluida kerja dengan kombinasi amonia dan amonia menunjukkan performa termodinamika yang lebih baik pada konfigurasi seri. Fluida kerja amonia-R1234ze (z) memiliki efisiensi *exergy* 49% dengan biaya

operasional 106,56 USD/jam, sedangkan fluida kerja amonia-amonia memiliki efisiensi *exergy* 51.15% dengan biaya operasional 124 USD/jam (**Chitgar et al., 2023b**). Tingginya performa dan efisiensi pada kombinasi fluida kerja amonia-amonia menunjukkan bahwa fluida kerja yang terlibat masih belum sesuai dengan konfigurasi yang digunakan. Panas sisa dari pemanas ORC pertama masih terlalu tinggi, sehingga masih cukup untuk menggerakkan amonia. Dengan demikian perlu dieksplorasi kombinasi fluida kerja sehingga konfigurasi seri dan paralel bisa dioptimalkan, sehingga efisiensi dapat ditingkatkan dengan biaya yang lebih rendah.

Konfigurasi ORC untuk geotermal telah berkembang dari konfigurasi dasar menjadi konfigurasi yang lebih kompleks. Modifikasi konfigurasi ini lebih bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan performa sistem ORC. Akan tetapi, modifikasi konfigurasi dasar menjadi konfigurasi lainnya atau konfigurasi seri dan paralel berarti menambah komponen di dalam sistem. Penambahan komponen tersebut akan meningkatkan kompleksitas sistem, konsumsi energi dan biaya operasional. Riset dan eksplorasi dari sisi multidimensi untuk optimalisasi konfigurasi sistem, pemilihan fluida, dan komponen peralatan terkait dengan sumber daya geotermal yang sesuai masih perlu untuk terus dilakukan.

Konfigurasi ORC untuk geotermal melibatkan pertukaran panas untuk mengurangi beban kerja kondensator dan pemanas, efisiensi pertukaran panas ini akan berpengaruh pada performa sistem secara keseluruhan. Akan tetapi, ada hubungan perhitungan kompromi antara biaya operasional dan kompleksitas sistem dengan efisiensi pertukaran panas yang harus diperhatikan. Efisiensi pertukaran panas akan meningkat dengan menurunkan perbedaan temperatur fluida panas dan fluida dingin. Area pertukaran panas dan ukuran peralatan menjadi lebih besar. Selain itu, modifikasi konfigurasi sistem ORC juga memerlukan ruang yang lebih besar. Dengan demikian, riset terkait dengan perencanaan eksploitasi geotermal dengan mempertimbangkan ruang spasial juga menjadi arah riset yang penting untuk rencana pembangunan geotermal sebagai pembangkit tenaga listrik. Konfigurasi yang bisa menghasilkan performa tinggi dalam lahan sempit menjadi perlu, sehingga pengembangan ORC untuk geotermal bisa dilakukan secara tersebar pada sumber daya dengan temperatur rendah dan menengah.

Konfigurasi sistem penghasil daya listrik pada geotermal perlu memperhatikan peran temperatur keluaran dari sistem dan produk yang dihasilkan. Dengan memanfaatkan konfigurasi dua tahap, maka kualitas dan kuantitas untuk pemanas dan pendingin jadi diperlukan. Pasokan panas, jumlah peralatan pemanas, dan kondisi area kerja perlu dikaji dan dianalisa dalam desain sistem konfigurasi dua tahap. Optimasi daya keluaran dan keperluan pemanasan dan pendinginan dari sistem masih perlu dikaji dan dihitung untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit daya geotermal.

Riset tentang fluida kerja juga masih diperlukan untuk memenuhi fluida kerja yang bisa menghasilkan performa kerja yang tinggi, tidak mudah terbakar, serta sesuai dengan temperatur geotermal yang dilakukan dan tidak memberikan efek negatif terhadap lingkungan. Karakter fisis yang selalu diperhatikan dalam pemilihan fluida adalah sifat termofisiknya, meliputi titik saturasi, dan tekanan kritis. Titik beku yang terlalu tinggi dan di atas temperatur minimal kondensator menyebabkan terjadinya pembekuan dan kristalisasi fluida di dalam saluran sehingga menyumbat aliran dan meningkatkan beban kerja pompa. Viskositas fluida kerja yang terlalu tinggi menyebabkan beban kerja pompa juga semakin besar dan banyak energi yang hilang akibat gaya gesek. Dengan demikian, titik beku (temperatur dan tekanan) fluida serta sifat viskositas fluida kerja perlu dikaji dan dipelajari dalam penentuan fluida kerja. Selain itu, riset terkait dengan pengembangan material baru sebagai fluida kerja juga menjadi arah riset untuk menghasilkan sistem ORC performa tinggi yang murah dan ramah lingkungan.

Pengembangan konfigurasi ORC membuat alternatif desain konfigurasi menjadi beragam. Keragaman ini juga membuka alternatif fluida kerja yang digunakan. Hal ini menyebabkan kompleksitas desain menjadi semakin rumit dan diperlukan analisis yang terintegrasi dari aspek efisiensi, lingkungan, ekonomi, dan tata ruang. Di sisi lain, perkembangan kecerdasan buatan (*artificial intelligent*), analisa *big data*, dan *machine learning* semakin pesat dewasa ini, sehingga dapat dijadikan sebagai perangkat untuk menganalisa dan mengestimasi potensi geotermal dan sistem ORC.

5. KESIMPULAN

Sistem ORC untuk pemanfaatan panas geotermal sebagai pembangkit daya listrik dapat digunakan pada sumber daya geotermal dengan temperatur rendah dan menengah. Berbagai konfigurasi ORC dan fluida kerja yang sesuai telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik dari geotermal. Selain performa sistem, penentuan konfigurasi dan fluida kerja perlu memperhatikan aspek ekonomi dan dampaknya terhadap lingkungan.

DAFTAR RUJUKAN

- Altun, A. F., & Kilic, M. (2020). Thermodynamic performance evaluation of a geothermal ORC power plant. *Renewable Energy*, 148, 261–274.
- Anderson, A., & Rezaie, B. (2019). Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future. *Applied Energy*, 248, 18–34.
- Baydar, C., Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., & Artaş, S. B. (2023). Performance and environmental improvements of a geothermal power plant by using structural and operational modification techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 88–105.
- Bina, S. M., Jalilinasrabady, S., & Fujii, H. (2017). Thermo-Economic Evaluation and Optimization of a Regenerative ORC Cycle Utilizing Geothermal Energy. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 41.
- Cetin, M., Urkan, O. D., Hekim, M., & Cetin, E. (2024). Power generation prediction of a geothermal-thermoelectric hybrid system using intelligent models. *Geothermics*, 118, 102911.
- Chitgar, N., Hemmati, A., & Sadrzadeh, M. (2023a). A comparative performance analysis, working fluid selection, and machine learning optimization of ORC systems driven by geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 286, 117072.
- Chitgar, N., Hemmati, A., & Sadrzadeh, M. (2023b). A comparative performance analysis, working fluid selection, and machine learning optimization of ORC systems driven by geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 286, 117072.

- Heberle, F., & Brüggemann, D. (2010). Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering*, *30*(11), 1326–1332.
- Javanshir, A., & Sarunac, N. (2017). Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy*, *118*, 85–96.
- Jiménez-García, J. C., Ruiz, A., Pacheco-Reyes, A., & Rivera, W. (2023). A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles. *Processes*, *11*(7), 1982.
- Keulen, L., Landolina, C., Spinelli, A., Iora, P., Invernizzi, C., Lietti, L., & Guardone, A. (2017). Design and commissioning of a thermal stability test-rig for mixtures as working fluids for ORC applications. *Energy Procedia*, *129*, 176–183.
- Lee, I., Tester, J. W., & You, F. (2019). Systems analysis, design, and optimization of geothermal energy systems for power production and polygeneration: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *109*, 551–577.
- Liu, G., Qin, Y., & Ji, D. (2023). Enhancing geothermal ORC power generation with SOFC: A comprehensive parametric study on thermodynamic performance. *Applied Thermal Engineering*, *233*, 121161.
- Loni, R., Mahian, O., Najafi, G., Sahin, A. Z., Rajaei, F., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., Bellos, E., & Le Roux, W. G. (2021). A critical review of power generation using geothermal-driven organic Rankine cycle. *Thermal Science and Engineering Progress*, *25*, 101028.
- Nondy, J., & Gogoi, T. K. (2021). Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, *245*, 114593.
- Rajabloo, T., Bonalumi, D., & Iora, P. (2017). Effect of a partial thermal decomposition of the working fluid on the performances of ORC power plants. *Energy*, *133*, 1013–1026.
- Solano-Olivares, K., Romero, R. J., Santoyo, E., Herrera, I., Galindo-Luna, Y. R., Rodríguez-Martínez, A., Santoyo-Castelazo, E., & Cerezo, J. (2019). Life cycle assessment of a solar absorption air-conditioning system. *Journal of Cleaner Production*, *240*, 118206.
- Song, J., Loo, P., Teo, J., & Markides, C. N. (2020a). Thermo-Economic Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Geothermal Power Generation: A Comparative Study of System Configurations. *Frontiers in Energy Research*, *8*, 6.
- Song, J., Loo, P., Teo, J., & Markides, C. N. (2020b). Thermo-Economic Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Geothermal Power Generation: A Comparative Study of System Configurations. *Frontiers in Energy Research*, *8*, 6.

- Wang, L., Yu, Z., Zhang, Y., & Yao, P. (2023). Review of machine learning methods applied to enhanced geothermal systems. *Environmental Earth Sciences*, *82*(3), 69.
- Wang, Y., Li, C., Zhao, J., Wu, B., Du, Y., Zhang, J., & Zhu, Y. (2021). The above-ground strategies to approach the goal of geothermal power generation in China: State of art and future researches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *138*, 110557.
- Zhai, H., Shi, L., & An, Q. (2014). Influence of working fluid properties on system performance and screen evaluation indicators for geothermal ORC (organic Rankine cycle) system.