

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Relevan

Organic Rankine Cycle (ORC) merupakan siklus termodinamika yang menggunakan fluida organik bertemperatur rendah untuk menggerakkan turbin. Beberapa penelitian berkaitan dengan penggunaan siklus ORC telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, baik secara eksperimental maupun secara empiris (Sanchez et al., 2025). Pintoro, *et al.* melakukan studi eksperimental kualitatif untuk menganalisis siklus *basic* ORC dengan menggunakan fluida kerja R-134a. Penelitian tersebut menganalisis temperatur sumber panas sebagai variabel bebas serta menggunakan tekanan dan temperatur uap masuk turbin sebagai variabel terikat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sumber panas akan meningkatkan temperatur dan tekanan pada *inlet* turbin, sehingga efisiensi dan *power output* dari siklus ORC tersebut akan meningkat (Pintoro & Siregar, 2019). Pamungkas dan Putra juga melakukan penelitian studi eksperimental terhadap pengaruh laju aliran massa fluida kerja R-123 terhadap performa dan efisiensi dari siklus ORC. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa dari R-123 akan meningkatkan daya yang dihasilkan turbin serta meningkatkan panas yang diserap oleh *condenser* dan *evaporator*. Peningkatan laju aliran massa fluida kerja tidak berpengaruh banyak terhadap kerja pompa, dan berbanding terbalik dengan *Back Work Ratio* dari siklus ORC. (Pamungkas & Putra, 2013).

Selain studi eksperimental, beberapa studi empiris terkait penggunaan siklus ORC pada *geothermal power plant* juga telah dilakukan. Atia *et al.* telah melakukan analisis empiris terkait penggunaan siklus ORC di Mesir. Penelitian tersebut memvariasikan temperatur *geofluid* sebesar 90–130 °C, laju aliran massa *geofluid* sebesar 10–50 kg/s dan temperatur reinjeksi antara 30–70 °C. Fluida yang digunakan adalah butana, isobutana, pentana dan R-245fa. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa fluida pentana memiliki performa yang lebih bagus pada *range* temperatur tersebut. Dari penelitian juga didapatkan bahwa semakin tinggi temperatur dari *geofluid*, maka laju perpindahan panas, *power output*, dan efisiensi dari siklus ORC akan semakin besar. Sedangkan kenaikan temperatur reinjeksi akan menurunkan laju perpindahan panas, *power output*, dan efisiensi dari siklus tersebut (Atia et al., 2017). Studi empiris tentang instalasi siklus ORC

pada siklus *bottoming cycle* di Indonesia juga telah dilakukan. Penelitian tentang pemasangan siklus ORC pada *bottoming cycle* pembangkit di Flores yang memiliki laju aliran massa uap *bottoming cycle* sebesar 62 t/h dan entalpi sebesar 2.430 kJ/kg telah dilakukan oleh Nandaliarasyad, *et al.*, dengan membandingkan beberapa fluida kerja seperti isobutana, butana, isopentana, isobutena, propana, propyne, neopentana, R-134a, R-245fa, dan R-236fa. Fluida kerja yang dapat menghasilkan *output* dan efisiensi tertinggi adalah isopentana dan *propyne* (Nandaliarasyad *et al.*, 2020). Pada kedua penelitian tersebut tidak menjelaskan analisis finansial pada penelitiannya.

Kemudian Vescovo, *et al.* membahas tentang penggunaan fluida organik pada sumber panas yang memiliki temperatur sangat tinggi ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) serta membandingkan performa dan analisis ekonomi pada pembangkit ORC dengan siklus pembangkit uap. Berdasarkan analisis dari EPC *Cost* dan O&M *cost*, Siklus ORC dengan temperatur sumber panas sangat tinggi tersebut dapat bersaing secara ekonomis dibandingkan dengan siklus ORC yang menggunakan temperatur tinggi ($150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Vescovo & Spagnoli, 2017). Selain dapat bersaing secara ekonomis dengan tipe pembangkit lain, ORC juga berpotensi menurunkan emisi GRK (Manopo & Rusirawan, 2024).

Penelitian terkait penggunaan siklus ORC pada aplikasi industri juga telah banyak dilakukan. Wei *et al.* telah melakukan penelitian tentang analisis ekonomi penggunaan ORC pada *waste heat* dari gas buang yang memiliki temperatur $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wei *et al.*, 2019). Patil *et al.* juga meneliti perbandingan termoeкономи antara solar ORC dengan *solar PV system*, dimana *solar ORC* juga dapat bersaing secara ekonomi terhadap sistem *solar PV* konvensional (Patil *et al.*, 2017). Studi yang dilakukan Hermawan dan Prabowo menunjukkan bahwa pemanfaatan panas gas buang economizer PLTU Adipala menggunakan micro *Organic Rankine Cycle* (ORC) mampu menghasilkan daya listrik bersih 5 kW tanpa mengganggu operasi boiler, serta layak secara ekonomi dengan NPV sekitar USD 11.000; IRR $\pm 19,8\%$; BCR 1,59; dan *payback period* sekitar 4,9 tahun. (Hermawan & Prabowo, 2025)

Serupa dengan penelitian Nandaliarasyad *et al.*, Azaria *et al.* telah melakukan penelitian termoeкономи terkait penggunaan siklus ORC dengan memanfaatkan sumber panas dari uap keluaran turbin PLTP Ulumbu, namun dengan menggunakan fluida kerja dan siklus yang berbeda. Keluaran uap tersebut memiliki laju aliran 62 t/h dan entalpi sebesar 2.435 kJ/kg. Penelitian tersebut membandingkan penggunaan siklus *basic ORC*

dan siklus Kalina, dengan fluida kerja yang digunakan adalah ammonia (untuk siklus Kalina). Sedangkan untuk siklus ORC, fluida kerja yang digunakan adalah butana, isobutana, pentana, isopentana, serta refrigeran. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa meskipun siklus Kalina memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan siklus *basic* ORC, namun *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) siklus Kalina lebih tinggi dibandingkan siklus *basic* ORC karena biaya *EPC Cost* dan *O&M Cost* siklus Kalina lebih tinggi dibandingkan dengan siklus *basic* ORC (Haykal Ahmad et al., 2023). Tarwaji dkk juga menganalisis pemanfaatan uap buang turbin *back-pressure* PLTP Ulumbu, binary ORC menghasilkan daya bersih maksimum 2.485,75 kW pada *Pinch Point Temperature Difference* (PPTD) 5 °C dengan fluida kerja n-pentana dan efisiensi siklus 5,13%, sedangkan optimasi ekonomi ORC memberikan NPV USD51 juta dengan propana pada PPTD 6°C serta LCOE 0,051 USD/kWh dengan R-134a pada PPTD 5 °C, namun secara keseluruhan teknologi *direct injection* tetap lebih unggul pada kondisi uap buang tersebut (Jaelani et al., 2025). Fenomena tersebut menarik untuk dilakukan penelitian, mengingat umumnya LCOE pembangkit akan lebih murah jika efisiensi pembangkit semakin tinggi. Pratama et al. melakukan studi termo ekonomi terhadap pengaruh penggunaan fluida kerja R601, fluida kerja campuran *zeotropic* R601 terhadap *Net Present Value* (NPV) dan kerja turbin maksimal dari siklus ORC. Siklus ORC yang digunakan adalah siklus *basic* ORC yang memanfaatkan sumber panas dari keluaran *separator* pada pembangkit yang telah ada. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa fluida kerja R601 akan memiliki NPV tertinggi jika digunakan pada siklus ORC tersebut. NPV tertinggi pada perhitungan tersebut adalah sebesar USD 29.224.825, di mana kerja turbin maksimal dari siklus sebesar 27,88 MW dan efisiensi termal sebesar 10,05%. Sedangkan penggunaan fluida kerja campuran R600/601 dan Butana/R601 akan menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 10,14%, namun nilai NPV secara berurutan adalah sebesar USD 25.730.482 dan USD 24.444.055 (Pratama et al., 2020). Harun dalam penelitiannya menggunakan pembangkit listrik biomassa berbasis *Organic Rankine Cycle* dengan fluida kerja n-pentana untuk meningkatkan kinerja pembangkit biomassa skala kecil, dimana penerapannya diperkirakan mampu meningkatkan efisiensi hingga lebih dari 25% serta menghasilkan sistem yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pembangkit uap konvensional (Rosyid, 2021).

Tidak banyak studi yang dilakukan pada lokasi Tulehu terkait pemanfaatan panas bumi pada lokasi tersebut. Pellu *et al.* membandingkan beberapa penggunaan fluida kerja pada siklus *basic* ORC dengan *preheater*, dan disimulasikan menggunakan HYSIS. Fluida kerja yang dibandingkan adalah isopentana, n-butana, dan isobutana. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa fluida isopentana memiliki kerja siklus terbaik jika dibandingkan dengan kedua fluida kerja lainnya, dengan nilai *net power output* sebesar 2.232,55 kW. Pada penelitian tersebut tidak dianalisis terkait efisiensi dan analisis finansial dari pembangkit tersebut. (Pellu et al., 2023). Pada penelitian lainnya, Pellu *et al.* membandingkan fluida kerja R-134a, isobutana, dan n-pentana, dengan menggunakan siklus *basic* ORC. Penelitian dilakukan dengan melakukan analisis produksi daya pada lima sumur yang ada. Hasil dari penelitian tersebut menyimpulkan bahwa fluida R134a merupakan fluida kerja terbaik yang dapat menghasilkan *power output* sebesar 10 MW pada kelima sumur di lokasi Tulehu. (Pellu et al., 2021). Noor *et al.* melakukan studi empiris dengan membandingkan beberapa siklus termodinamika menggunakan Epsilon dan Thermolib. Siklus termodinamika yang dibandingkan adalah siklus *basic* ORC, siklus *basic* ORC dengan *recuperator*, serta siklus *basic* ORC dengan *recuperator* dan *preheater*, di mana fluida kerja yang digunakan adalah R245fa. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa siklus *basic* ORC dengan *preheater* dan *recuperator* memiliki efisiensi tertinggi sebesar 12,6%. LCOE dari siklus tersebut adalah sebesar Rp1.093,04/kWh (Noor & Anggoro, 2020).

2.2. Landasan Teori

Jenis pembangkit panas bumi dapat dibagi menjadi tiga yaitu tipe *dry steam*, *flash steam*, dan *binary plant* atau disebut juga *Organic Rankine Cycle* (ORC) (Tomarov & Shipkov, 2017). PLTP dengan jenis *dry steam* dan *flash steam plants* digunakan untuk sumur *geofluid* yang memiliki karakteristik entalpi tinggi. Siklus biner atau ORC digunakan pada sumur *geofluid* yang memiliki karakteristik entalpi rendah.

Pada sistem panas bumi bertipe *water-dominated*, sebagian besar energi panas tersimpan dalam fase cair dengan fraksi uap yang relatif kecil. Kondisi ini menyebabkan efisiensi pembangkitan menggunakan teknologi *dry steam* atau *flash steam* menjadi rendah. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan teknologi siklus

biner atau *Organic Rankine Cycle* (ORC) lebih efektif karena mampu memanfaatkan panas sensibel dari *brine* melalui penukar panas tanpa memerlukan fraksi uap yang besar.

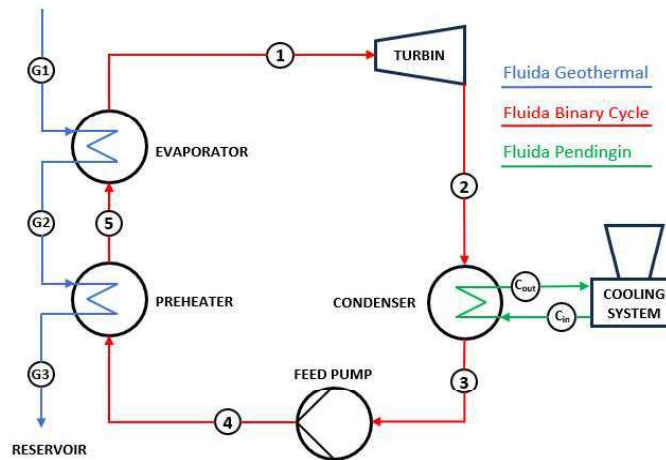
ORC menggunakan fluida kerja sekunder yang memiliki temperatur didih rendah untuk menyerap panas dari *geofluid* yang berasal dari dalam perut bumi. Fluida kerja yang telah menguap tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin. ORC lebih efektif digunakan pada *geofluid* yang memiliki temperatur rendah jika dibandingkan dengan tipe *dry steam plants* maupun *flash steam plants* (Valdimarsson, 2011).

2.2.1. Siklus Termodinamika Siklus Biner

Untuk melakukan analisis performa siklus biner, maka perlu dilakukan simulasi pada beberapa siklus termodinamika dengan parameter temperatur *geofluid* dan efisiensi peralatan yang sama.

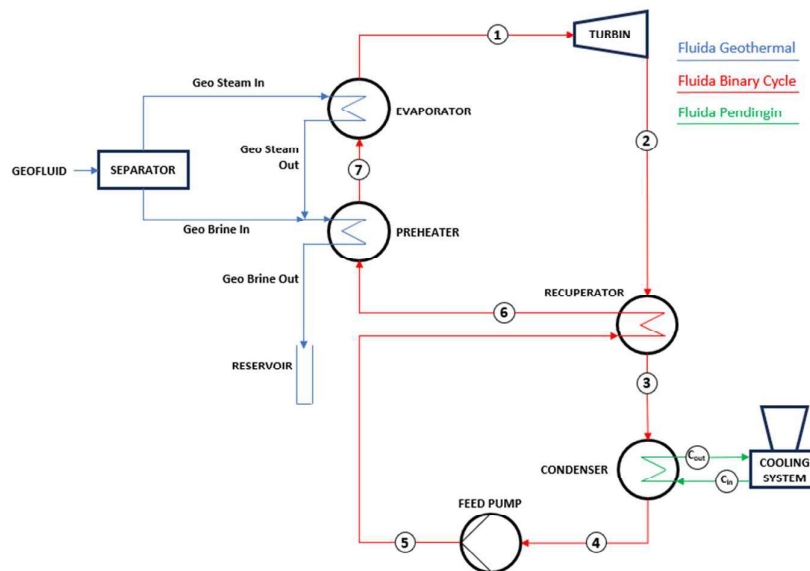
Beberapa tipe siklus termodinamika siklus biner yang umum dipakai adalah siklus *basic organic rankine cycle*, siklus biner dengan *recuperator*, siklus Kalina, dll.

Siklus dasar siklus biner terdiri dari *evaporator*, *preheater*, turbin, *condenser*, dan *feed pump*. *Evaporator* berfungsi untuk menyerap panas yang berasal dari *geofluid* dan digunakan untuk memanaskan fluida kerja siklus biner sehingga mengubah fase fluida kerja menjadi uap. Uap yang dihasilkan dari *evaporator* akan digunakan untuk menggerakkan turbin. Uap yang keluar dari turbin kemudian didinginkan oleh *condenser* dan mengubah fase fluida kerja menjadi cair jenuh. Fluida pendingin dari *condenser* dapat menggunakan air maupun menggunakan udara. Kemudian fluida kerja tersebut akan melalui *feed pump* untuk menaikkan tekanan sesuai dengan tekanan kerja turbin. *Preheater* digunakan untuk pemanas mula sebelum fluida kerja akan diubah fasenya menjadi uap di *evaporator*. Siklus dasar siklus biner tanpa *recuperator* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Siklus sederhana siklus biner (Parada, 2013)

Siklus biner dapat dimodifikasi dengan penambahan *recuperator*. *Recuperator* adalah penukar panas yang digunakan untuk pemanasan fluida kerja dengan menggunakan uap yang keluar dari turbin. Penambahan *recuperator* kedalam siklus ditunjukkan pada Gambar 2.2 *Recuperator* meningkatkan temperatur fluida kerja pada *inlet preheater* sehingga akan menyebabkan temperatur fluida panas bumi yang akan di reinjeksi menjadi lebih tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa panas yang diperoleh dari fluida panas bumi digantikan oleh panas yang diperoleh di *recuperator*.



Gambar 2.2. Siklus biner dengan *recuperator* (Parada, 2013)

Pada penelitian ini, konfigurasi siklus yang digunakan adalah siklus biner dengan *recuperator*.

2.2.2. Pemilihan Jenis Fluida Kerja

Karakteristik fluida kerja yang digunakan pada siklus biner adalah yang memiliki temperatur kritis lebih rendah dibandingkan air. Jenis fluida kerja organik yang dapat digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan fluida kerja untuk siklus biner (PLN-BRIN, 2023)

<i>Fluid</i>	<i>Formula</i>	<i>Critical temp (°C)</i>	<i>Condensing pressure @40 °C (bar)</i>	<i>Molar mass (kg/kmol)</i>	<i>Toxicity</i>	<i>Flammability</i>	<i>ODP*</i>	<i>GWP**</i>
Propana	C ₃ H ₈	96,95	13,69	44,09	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	0	3
Isobutana	i-C ₄ H ₁₀	135,9	5,31	58,12	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	0	3
n-Butana	C ₄ H ₁₀	150,8	3,79	58,12	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	0	3
isopentana	i-C ₅ H ₁₂	187,8	1,51	72,15	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	0	3
n-pentana	C ₅ H ₁₂	193,9	1,14	72,15	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	0	3
R1233zd(E)	C ₃ H ₂ ClF ₃	165,5	2,15	130,5	<i>Non-toxic</i>	<i>Non-flam</i>	0	1
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	145,7	3,37	170,9	<i>Non-toxic</i>	<i>Non-flam</i>	0,7	5,85
R134a	CH ₂ FCF ₃	101,0	10,17	102,0	<i>Low</i>	<i>Non-flam</i>	0	1,43
R254fa	C ₃ H ₃ F ₅	154,0	2,49	134,0	<i>Low</i>	<i>Non-flam</i>	0	1,03
Ammonia	NH ₃	133,6	15,55	17,03	<i>Toxic</i>	<i>Lower</i>	0	0
Water	H ₂ O	374,1	0,07	18,02	<i>Non-toxic</i>	<i>Non-flam</i>	0	0

*Ozone Depletion Potential **Global Warming Potential

Beberapa pertimbangan untuk memilih jenis fluida kerja adalah sebagai berikut :

a. Temperatur Kritis

Fluida kerja yang akan dipilih harus memiliki temperatur kritis yang lebih rendah dibandingkan dengan temperatur kritis air. Air digunakan sebagai referensi *heating fluid*.

b. Tekanan Kondensasi

Tekanan kondensasi adalah tekanan dimana sebuah fluida mulai terkondensasi. Semakin rendah tekanan kondensasi suatu fluida kerja maka akan semakin murah biaya peralatan (*Heat exchanger* dan *piping*) dan

operasionalnya (*pumping cost*). Tekanan kondensasi sebaiknya tidak lebih rendah dari tekanan atmosfer, karena dapat mengakibatkan udara masuk ke dalam sistem.

c. Faktor I

Faktor I adalah suatu parameter yang menjelaskan kondisi fasa fluida ketika meninggalkan turbin, parameter ini didefinisikan oleh Kihara dan Fukunaga (1975).

Bila nilai faktor $I < 1$, kondisi fluida kerja keluar turbin masih dalam kondisi *superheat*. Namun jika faktor $I > 1$, sebagian fluida tersebut sudah mulai terkondensasi. Selain dapat menurunkan efisiensi turbin, fluida kerja yang terkondensasi juga dapat menimbulkan kerusakan pada turbin.

d. Pertimbangan keamanan

Pertimbangan keamanan pada pemilihan fluida kerja mencakup beberapa hal seperti toksisitas, *flammability*, ODP (*Ozone Depletion Potential*), dan GWP (*Global Warming Potential*). Fluida kerja yang cenderung tidak aman dan merusak sangat tidak dianjurkan penggunaannya untuk industri pembangkit listrik karena akan menyebabkan kerugian yang berdampak luas terutama pada lingkungan.

1. Toksisitas

Toksisitas merupakan parameter seberapa beracun suatu senyawa. fluida kerja diharapkan memiliki toksisitas rendah untuk mencegah jatuhnya korban bila terjadi kebocoran.

2. *Flammability*

Flammability merupakan parameter seberapa mudah suatu senyawa terbakar. Fluida kerja diharapkan memiliki *flammability* rendah untuk mencegah terjadinya kebakaran akibat kondisi proses maupun bila terjadi kebocoran. Senyawa hidrokarbon umumnya mudah terbakar dan diperlukan penggunaan sistem pemadam kebakaran yang tepat untuk menanggulangi efek *flammability* dari hidrokarbon.

3. *Ozone Depletion Potential (ODP)*

Ozone Depletion Potential merupakan parameter seberapa aktif suatu senyawa merusak lapisan ozon. Fluida kerja diharapkan memiliki ODP rendah untuk mencegah rusaknya kelestarian lingkungan. Nilai ODP 1,0 merujuk kepada R-12 yang memiliki dampak ODP terburuk. Sedangkan penggunaan R-12 dan R-114 telah dilarang penggunaannya di beberapa negara, selain memiliki ODP yang relatif tinggi, kedua senyawa tersebut juga memiliki nilai GWP yang tinggi.

4. *Global Warming Potential (GWP)*

Global Warming Potential merupakan parameter seberapa besar pengaruh suatu senyawa terhadap pemanasan global. Fluida kerja diharapkan memiliki GWP rendah untuk mencegah pemanasan global lebih lanjut. Nilai GWP acuan yang digunakan berdasarkan nilai GWP CO₂ yang bernilai 1,0. Sejauh ini senyawa yang telah dilarang untuk dipergunakan di berbagai negara adalah R-12 yang memiliki nilai GWP sebesar 4.500 dan R-114 yang memiliki nilai GWP 5.850.

Meskipun banyak penelitian mengenai fluida kerja untuk aplikasi siklus biner, kesimpulannya tidak mengarah pada satu fluida optimal untuk tingkat suhu dan aplikasi tertentu. Hal ini terutama disebabkan oleh keragaman fungsi objektif yang dipilih saat menyeleksi fluida kerja (Quoilin et al., 2012). Dari berbagai referensi, isobutana, isopentana, n-pentana, R-245fa, R1233zd(E) ataupun fluida kerja lainnya dapat memiliki performa yang paling optimal, tergantung dari kondisi *geofluid*, temperatur reinjeksi, dan parameter yang lain.

Apabila terdapat beberapa fluida kerja siklus biner yang dapat digunakan, maka fluida kerja siklus biner tersebut harus dibandingkan untuk mendapatkan *power output* dan efisiensi yang terbaik. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan siklus termodinamika dan asumsi yang sama. Pemilihan fluida kerja dipengaruhi oleh temperatur *geothermal fluid* yang digunakan untuk memanaskan fluida siklus biner,

temperatur reinjeksi, properties fluida kerja siklus biner, serta nilai *pinch point* pada *heat exchanger*.

Pemilihan fluida kerja yang dilakukan pada studi ini dilakukan dengan meninjau kesesuaian sifat termofisika fluida kerja dengan sifat termofisika fluida geotermal. Temperatur desain pada studi ini adalah sebesar 166 °C. Oleh karena itu, fluida kerja yang dipilih harus memiliki temperatur kritis yang berada di sekitar atau sedikit di atas temperatur *geofluid*, sehingga proses perpindahan panas dan ekspansi turbin dapat berlangsung secara optimal.

Fluida kerja n-pentana dan isopentana dipilih karena keduanya memiliki karakteristik termodinamika yang sesuai untuk sumber panas bertemperatur menengah. n-Pentana memiliki temperatur kritis sebesar 193,9 °C, sedangkan isopentana memiliki temperatur kritis sebesar 187,8 °C, yang mendekati temperatur desain dari *geofluid* yang digunakan pada studi ini yaitu sebesar 166 °C.

Dari sisi tekanan kondensasi pada temperatur lingkungan sekitar 40 °C, n-pentana memiliki tekanan kondensasi relatif rendah (1,14 bar pada 40 °C), sehingga memiliki keunggulan dari kinerja kondensor dan dapat meningkatkan kerja yang dihasilkan oleh proses ekspansi turbin. Sementara itu, isopentana memiliki tekanan kondensasi yang sedikit lebih tinggi (1,51 bar pada 40 °C), namun masih berada dalam rentang yang aman dan praktis untuk sistem pendingin udara (*air-cooled condenser*) yang digunakan di lokasi penelitian.

Selain aspek termodinamika, pertimbangan keselamatan dan lingkungan juga menjadi faktor penting dalam pemilihan fluida kerja. n-pentana dan isopentana memiliki karakteristik yang serupa, yaitu bersifat mudah terbakar dengan tingkat *flammability* yang tinggi, namun memiliki nilai *Ozone Depletion Potential* dan *Global Warming Potential* rendah, sehingga kedua fluida kerja tersebut relatif ramah lingkungan.

Dengan mempertimbangkan kesesuaian temperatur kritis terhadap temperatur desain *geofluid* yang digunakan pada studi, karakteristik tekanan operasi, serta aspek keselamatan dan lingkungan, n-pentana dan isopentana dipilih sebagai fluida kerja dalam penelitian ini untuk dibandingkan kinerja teknis dan kelayakan finansialnya pada PLTP siklus biner di WKP Tulehu

2.2.3. Temperatur Reinjeksi *Geothermal Fluid*

Reinjeksi adalah bagian yang sangat penting dari setiap pengembangan panas bumi dan menjadi faktor kunci dalam menentukan kadar pengendapan silika pada pipa. Reinjeksi awalnya dipakai sebagai metode untuk pembuangan air limbah, namun saat ini menjadi alat penting untuk manajemen lapangan panas bumi.

Untuk mencapai konversi maksimum energi panas bumi menjadi listrik, fluida panas bumi harus didinginkan sampai temperatur serendah mungkin. Fluida panas bumi dapat menjadi jenuh dengan silika saat didinginkan. Pada umumnya, semakin tinggi temperatur sumber panas (sumur), konsentrasi silika pada fluida panas bumi akan semakin tinggi, yang menyebabkan kondisi super jenuh pada *brine* semakin tinggi. Kondisi ini menyebabkan *silica scaling* pada perpipaian sumur reinjeksi, *heat exchangers*, dan fasilitas produksi lainnya.

Temperatur batas silika adalah temperatur terendah pada saat silika yang terlarut dalam fluida panas bumi diperkirakan akan mengendap. Temperatur tersebut dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan perhitungan *Silica Solubility Index* yang mengasumsikan kelarutan silika dalam molal NaCl (DiPippo, 2016).

Karena tidak terdapat data terkait silika pada sumur TLU-D-01, maka temperatur reinjeksi pada studi ini diasumsikan sebesar 110 °C.

2.2.4. Perhitungan Performa Siklus Biner dengan Berbagai Fluida Kerja

Performa termodinamika dianalisis dengan menggunakan siklus dasar Rankine dengan *recuperator* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 pada subbab 2.2.1.

2.2.4.1. *Preheater dan Evaporator*

Preheater dan *evaporator* merupakan komponen *heat exchanger* pada siklus biner yang berfungsi untuk memindahkan panas dari *geothermal fluid* ke fluida kerja siklus biner. *Preheater* berfungsi untuk menaikkan temperatur dari fluida kerja siklus biner pada fasa cair. *Evaporator* berfungsi untuk mengubah fasa fluida kerja siklus biner menjadi uap jenuh.

Perpindahan panas pada *preheater* dapat dihitung dengan persamaan berikut (Parada, 2013)

$$\dot{m}_{steam}(h_{steam,out} - h_{brine,out}) + \dot{m}_{brine}(h_{brine,in} - h_{brine,out}) = \dot{m}_{BC}(h_7 - h_6) \quad (2.1)$$

Sedangkan perpindahan panas pada *evaporator* dapat dicari menggunakan persamaan berikut (Parada, 2013)

$$\dot{m}_{steam}(h_{steam,in} - h_{steam,out}) = \dot{m}_{BC}(h_1 - h_7) \quad (2.2)$$

Dimana

- $\dot{m}_{steam,in}$ = laju aliran massa *geothermal steam inlet* (kg/s)
- $\dot{m}_{brine,in}$ = laju aliran massa *geothermal brine inlet* (kg/s)
- $\dot{m}_{steam,out}$ = laju aliran massa *geothermal steam outlet* (kg/s)
- $\dot{m}_{brine,out}$ = laju aliran massa *geothermal brine outlet* (kg/s)
- $h_{steam,in}$ = Entalpi *geothermal steam* pada *inlet evaporator* (K)
- $h_{brine,in}$ = Entalpi *geothermal brine* pada *inlet preheater* (K)
- $h_{steam,out}$ = Entalpi *geothermal steam* pada *outlet evaporator* (K)
- $h_{brine,outlet}$ = Entalpi *geothermal brine* pada *outlet preheater* (K)
- $\dot{m}_{BC}$ = laju aliran massa fluida kerja siklus biner (kg/s)
- h_1 = entalpi pada *inlet turbin* (kJ/kg)
- h_6 = entalpi pada *outlet recuperator* (kJ/kg)
- h_7 = entalpi pada *inlet evaporator* (kJ/kg)

2.2.4.2. Pinch Point Heat Exchanger

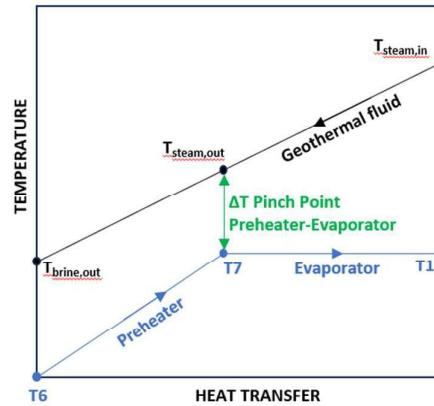
Untuk mendesain *preheater* dan *evaporator* perlu mempertimbangkan nilai perbedaan temperatur *pinch point* antara temperatur *geothermal fluid* dan fluida kerja siklus biner. *Pinch point* didefinisikan sebagai perbedaan temperatur terkecil antara fluida pemanas dan fluida pendingin.

Nilai perbedaan temperatur *pinch point* yang digunakan dalam perhitungan dapat menggunakan referensi dari beberapa pabrikan. Dengan menggunakan referensi dari Gambar 2.3, nilai perbedaan temperatur *pinch point* dapat diformulasikan sebagai berikut (Parada, 2013)

$$\Delta T_{Pevaporator} = T_{steam,out} - T_7 \quad (2.3)$$

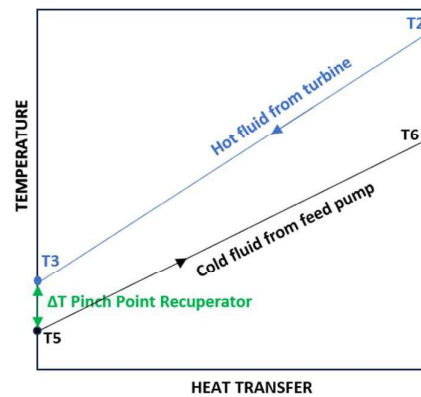
Dimana

- ΔT_{pp} = Perbedaan temperatur *pinch point evaporator-preheater* (K)
- T_7 = Temperatur *inlet evaporator* (K)



Gambar 2.3. Perbedaan temperatur *pinch point* pada *preheater* dan *evaporator*

Sedangkan perbedaan temperatur *pinch point* pada *recuperator* dapat dicari dengan mencari nilai selisih paling kecil antara temperatur fluida panas dan fluida dingin. Ilustrasi perbedaan temperatur *pinch point* pada *recuperator* dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut (Parada, 2013).



Gambar 2.4. Perbedaan temperatur *pinch point* pada *recuperator*

Perbedaan temperatur *pinch point* pada *recuperator* dapat diformulasikan sebagai berikut (Parada, 2013).

$$\Delta T_{PPrecuoerator} = \min (T_{hot} - T_{cold}) = \min [(T_2 - T_6), (T_3 - T_5)] \quad (2.4)$$

2.2.4.3. Turbin

Turbin adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi termodinamika uap fluida kerja siklus biner menjadi kerja mekanis pada poros turbin. Kerja turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Moran et al., 2010).

$$W_T = \dot{m}_{BC}(h_1 - h_2) = \eta_T \cdot \dot{m}_{BC}(h_1 - h_{2s}) \quad (2. 5)$$

Dimana

- W_T = daya turbin (Watt)
- h_2 = entalpi pada *outlet* turbin (kJ/kg)
- h_{2s} = entalpi isentropis pada *outlet* turbin (kJ/kg)
- η_T = efisiensi turbin (%)

2.2.4.4. *Condenser*

Condenser adalah suatu penukar panas yang berfungsi untuk menurunkan temperatur dan/atau mengubah uap turbin menjadi cairan. Media pendingin dari *condenser* dapat menggunakan air atau udara. Panas yang dilepas *condenser* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Moran et al., 2010).

$$Q_C = \dot{m}_{BC}(h_4 - h_3) \quad (2. 6)$$

Dimana

- Q_C = kalor yang dilepas *condenser* (Watt)
- h_4 = entalpi pada *outlet* condenser (kJ/kg)

2.2.4.5. *Feed Pump*

Feed pump berfungsi untuk menaikkan tekanan fluida kerja pada *condenser* menjadi tekanan kerja dari turbin (Moran et al., 2010).

$$W_P = \dot{m}_{BC}(h_5 - h_4) = \eta_P \cdot \dot{m}_{BC}(h_5 - h_{4s}) \quad (2. 7)$$

Dimana

- W_P = Daya untuk menggerakkan *feed pump* (Watt)
- H_4 = entalpi pada *outlet feed pump* (kJ/kg)
- H_{4s} = entalpi isentropis pada *outlet feed pump* (kJ/kg)
- η_P = efisiensi *feed pump* (%)

2.2.4.6. Air/Water Cooling System

Cooling system berguna untuk mengubah fase dari fluida kerja siklus biner. Fluida yang digunakan tergantung dari ketersediaan media pendingin yang ada di lokasi pembangkit, yang dapat berupa air maupun udara.

Mengacu kepada Gambar 2.2, perpindahan panas yang terjadi pada *condenser* dapat diformulasikan sebagai berikut (Moran et al., 2010):

$$\dot{m}_C C_{pC} (TC_{out} - TC_{in}) = \dot{m}_{BC} (h_3 - h_4) \quad (2. 8)$$

Dimana

$\dot{m}_C$ = laju aliran massa fluida pendingin (kg/s)

C_{pC} = *specific heat* fluida pendingin (kJ/kg.K)

TC_{in} = Temperatur *inlet* fluida pendingin (K)

TC_{out} = Temperatur *outlet* fluida pendingin (K)

2.2.5. Pinch Point Condenser

Untuk mendesain *condenser* perlu mempertimbangkan nilai perbedaan temperatur *pinch point* antara temperatur fluida pendingin dan fluida kerja siklus biner.

Nilai temperatur *pinch point* yang digunakan dalam perhitungan dapat menggunakan referensi dari beberapa pabrikan. Dengan menggunakan referensi dari Gambar 2.5, nilai perbedaan *pinch point temperature* dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$\Delta T_{PPcondenser} = T_{PP} - TC_{PP} \quad (2. 9)$$

Dimana

$\Delta T_{PPcondenser}$ = Perbedaan temperatur *pinch point condenser* (K)

T_{PP} = Temperatur pada tekanan uap jenuh *condenser* (K)

TC_{PP} = Temperatur pada saat terjadi *pinch point condenser* (K)

Mengacu pada Gambar 2.5 berikut maka TC_{pp} dan T_{pp} untuk perhitungan perbedaan temperatur *pinch point* pada *condenser* dapat dicari dengan menggunakan formula berikut (Parada, 2013):

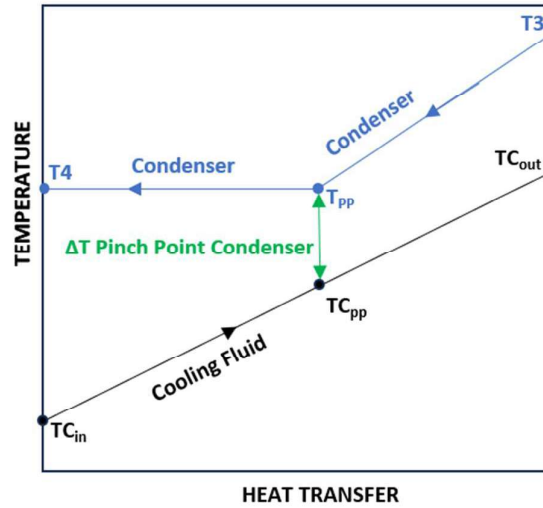
$$\dot{m}_C C_{pC} (TC_{out} - TC_{pp}) = \dot{m}_{BC} (h_{pp} - h_3) \quad (2. 10)$$

Atau

$$\dot{m}_C C p_C (T_{C_{pp}} - T_{C_{in}}) = \dot{m}_{BC} (h_4 - h_{pp}) \quad (2.11)$$

Dimana

h_{pp} = entalpi pada tekanan uap jenuh *condenser* (kJ/kg)



Gambar 2.5. Perbedaan temperatur *pinch point* pada *condenser* (Parada, 2013)

2.2.6. Perhitungan Daya Siklus Biner

Heat input ($Q_{geofluid}$) pada studi ini merupakan panas yang berasal dari fluida *geothermal*. *Heat input* yang berasal dari fluida *geothermal* tersebut kemudian diserap oleh *preheater* dan *evaporator*. *Heat input* yang diserap dapat diformulasikan sebagai berikut (Moran et al., 2010).

$$Q_{geofluid} = \dot{m}_{steam} (h_{steam,in} - h_{brine,out}) + \dot{m}_{brine} (h_{brine,in} - h_{brine,out}) = \dot{m}_{BC} (h_1 - h_6) \quad (2.12)$$

Dimana

η_{BC} = efisiensi siklus biner (%)

$Q_{geofluid}$ = kalor yang diserap dari *geothermal fluid* (Watt)

Daya gross yang dihasilkan oleh PLTP didapatkan dari hasil perhitungan simulasi dengan menggunakan formula (2. 1)–(2. 12) di atas.

Sedangkan daya *netto* yang dihasilkan dari siklus biner dapat dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut (Moran et al., 2010):

$$W_{net} = W_T - W_{aux} \quad (2.13)$$

Dimana *auxiliary power* (W_{aux}) dapat dicari dari penjumlahan *auxiliary power* yang digunakan pada siklus termodinamika. Dengan menggunakan siklus termodinamika pada Gambar 2.2 maka *auxiliary power* dari sistem tersebut adalah (Moran et al., 2010).

$$W_{aux} = W_P + W_{cooling\ system} \quad (2.14)$$

Dimana

W_T = Daya *gross* siklus biner (Watt)

W_{net} = Daya *netto* siklus biner (Watt)

W_{aux} = *total auxiliary power* (Watt)

$W_{cooling\ system}$ = daya *cooling system* (Watt)

W_P = daya pompa (Watt)

2.2.7. Perhitungan Efisiensi Siklus Biner

Efisiensi siklus biner (η_{BC}) dapat dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut (Moran et al., 2010).

$$\eta_{BC} = \frac{W_T}{Q_{geofluid}} \quad (2.15)$$

2.2.8. Penjualan Energi Listrik

Penjualan energi listrik dihitung berdasarkan jumlah energi yang dibangkitkan oleh pembangkit dikalikan dengan harga jual pada titik serah energi listrik tersebut pada jaringan terdekat.

2.2.9. Net Present Value

Net Present Value (NPV) merupakan selisih antara nilai sekarang dari investasi dengan nilai sekarang dari penerimaan uang kas bersih dimasa mendatang. Investasi dikatakan layak jika nilai NPV > 0 (Brigham & Daves, 2019).

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (2.16)$$

Dimana :

NPV = *Net Present Value* (IDR atau USD)

CF_t = *Cash flow* pada tahun t

t = 1,2,3, ...

r = *cost of capital* proyek

n = jumlah tahun

2.2.10. *Benefit Cost Ratio*

Benefit cost ratio (BCR) adalah perbandingan antara jumlah nilai sekarang dari seluruh arus kas masuk dibandingkan dengan dengan jumlah nilai sekarang dari seluruh arus kas keluar selama umur proyek. Proyek dikatakan menguntungkan jika nilai BCR memiliki nilai lebih dari satu (BCR > 1) (Brigham & Daves, 2019).

$$BCR = \frac{\text{Present value of benefits}}{\text{Present value of costs}} \quad (2.17)$$

2.2.11. *Internal Rate of Return*

Analisa metode penilaian *Internal Rate of Return* (IRR) adalah tingkat pengembalian investasi pada saat NPV bernilai nol, dengan mempertimbangkan *discounted factor* pada suatu investasi. Investasi akan menguntungkan jika nilai IRR lebih besar dari nilai WACC (Brigham & Daves, 2019).

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (2.18)$$

Dimana :

IRR = *Internal Rate of Return* (%)

CF_t = *Cash flow* pada tahun t

t = 1,2,3, ...

n = jumlah tahun

2.2.12. *Payback period*

Payback period didefinisikan sebagai jumlah tahun yang diharapkan untuk dapat mengembalikan investasi awal suatu proyek. Metode ini merupakan metode formal pertama yang digunakan dalam evaluasi penganggaran modal (*capital budgeting*).

Konsep dasar dari metode *payback period* adalah memulai perhitungan dari total biaya investasi proyek, kemudian menentukan jumlah tahun yang diperlukan hingga biaya tersebut hampir seluruhnya kembali. Setelah itu, ditentukan fraksi dari tahun berikutnya yang dibutuhkan untuk mencapai pengembalian penuh, dengan asumsi bahwa arus kas terjadi secara merata selama satu tahun (Brigham & Daves, 2019).

$$PP = \text{Number of years prior to full recovery} + \frac{\text{Unrecovered cost at start of year}}{\text{cash flow during full recovery year}} \quad (2. 19)$$

2.3. Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran disusun untuk mengetahui gambaran sistematis mengenai alur penelitian dan pendekatan yang dilakukan dalam menganalisis kelayakan pembangunan PLTP di Tulehu Maluku Tengah. Analisis kelayakan yang dibahas dalam penelitian ini adalah mencakup analisis teknis dan analisis finansial PLTP siklus biner dengan menggunakan dua fluida kerja, yaitu n-pentana dan isopentana.

Analisis kelayakan teknis dilakukan melalui pemodelan siklus termodinamika PLTP siklus biner yang menggunakan konfigurasi siklus dasar Rankine dengan menggunakan *recuperator*. Dua skenario pemodelan disusun berdasarkan dua jenis fluida kerja yang digunakan, yaitu n-pentana dan isopentana. Dari masing-masing pemodelan, diturunkan persamaan termodinamika untuk setiap komponen utama pembangkit. Asumsi efisiensi peralatan diambil dari referensi penelitian terdahulu yang relevan. Simulasi termodinamika kemudian dilakukan menggunakan perangkat lunak *Engineering Equation Solver* (EES) *Student* versi 12.087. Data input diperoleh dari hasil pengeboran yang dilakukan oleh PLN, mencakup laju alir massa, tekanan, dan temperatur *geofluid*. Dengan bantuan perangkat lunak EES, estimasi daya dan efisiensi termal PLTP siklus biner dari kedua skenario dapat diperoleh dan digunakan sebagai dasar untuk perhitungan analisis finansial.

Analisis finansial dilakukan dengan menggunakan dua skenario berdasarkan pemodelan yang dilakukan pada analisis teknis, yaitu skenario PLTP Biner menggunakan

fluida kerja n-pentana dan isopentana. Analisis finansial dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan finansial proyek berdasarkan proyeksi arus kas (*cash flow*). Estimasi biaya investasi dilakukan melalui pendekatan perhitungan *EPC cost*, *field development cost* dan biaya eksplorasi berdasarkan data yang dimiliki oleh PLN. Estimasi pendapatan didasarkan pada penjualan listrik sesuai kapasitas pembangkit yang diperoleh dari hasil simulasi teknis dengan harga jual mengacu kepada harga jual listrik rata-rata PLN. Perhitungan kelayakan finansial dianalisis dengan mengacu kepada biaya investasi, biaya operasional, serta harga jual listrik rata-rata berdasarkan laporan statistik dan data yang dimiliki oleh PLN dan Geo Dipa.

Indikator utama yang digunakan pada analisis finansial adalah menggunakan metode NPV, BC *Ratio*, IRR, dan *payback period*. Analisis finansial dalam studi ini bertujuan untuk mengetahui kelayakan finansial pada dua skenario, yaitu kelayakan finansial pembangunan PLTP dengan menggunakan fluida kerja n-pentana dan kelayakan finansial pembangunan PLTP dengan menggunakan fluida kerja isopentana.

Dengan menggabungkan kedua pendekatan ini, kerangka penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi pengembangan PLTP siklus di WKP Tulehu, baik dari sisi teknis performa pembangkit maupun kelayakan finansial, sehingga dapat menjadi referensi untuk pengembangan pembangkit panas bumi serupa di wilayah lain di Indonesia.