

SKRIPSI

**PEMANFAATAN AIR PANAS PINCARA UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK SKALA KECIL SISTEM *ORGANIC
RANKINE CYCLE (ORC)* DI KAB. LUWU UTARA**

Disusun dan diajukan oleh:

**ALIF FADJRIN
D041 18 1511**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PEMANFAATAN AIR PANAS PINCARA UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK SKALA KECIL SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)* DI
KAB. LUWU UTARA**

Disusun dan diajukan oleh:

ALIF FADJRIN

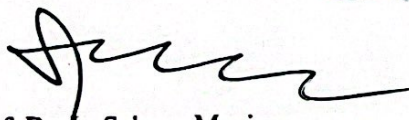
D041 18 1511

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 11 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

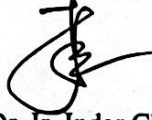
Pembimbing I,

Pembimbing II,


Prof. Dr. Ir. Salama Manjang,

M.T., IPM

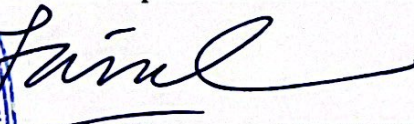
NIP. 19691026 199412 2 001


Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin,

ST., MT., IPM.

NIP. 19751205 200501 2 002

Ketua Departemen Teknik Elektro,


Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE

NIP. 19750605 200212 1 004



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Alif Fadjrin
NIM : D041181511
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**PEMANFAATAN AIR PANAS PINCARA UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK SKALA KECIL SISTEM ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)
DI KAB. LUWU UTARA**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklasifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 9 September 2024

Yang Menyatakan

 
Alif Fadjrin

KATA PENGANTAR

Segala puji atas kehadiran Allah subhanahu wa ta'ala atas berkat dan hidayahNya sehingga penulis dapat menyusun penelitian yang berjudul: “PEMANFAATAN AIR PANAS PINCARA UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK SKALA KECIL SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)* DI KAB. LUWU UTARA”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagai syarat menyelesaikan studi bagi mahasiswa program S1 di program Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

Terselesaikannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis mengucapkan banyak terima kasih bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Keluarga saya yang sangat saya banggakan dan sayangi terutama kedua orang tua saya yang selalu tulus mendukung dalam segala aspek baik moril dan materil dan selalu mendoakan saya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT., IPM. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Ir.. Gassing, M.T. selaku Dosen Penguji I dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. selaku Dosen Penguji II.
4. Seluruh dosen dan staf pegawai Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu dan memberi kemudahan selama menempuh proses perkuliahan.
5. Kepala desa, tokoh pemuda dan seluruh masyarakat Desa Pincara yang telah banyak membantu selama pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini.

6. Kepada teman-teman Lab Riset Grup Infrastruktur Ketenagalistrikan dan Teknik Tegangan Tinggi yang selalu menemani saat proses penyusunan skripsi ini.
7. Teman-teman CAL18BRATOR yang senantiasa menemani dan memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama masa studi.
8. Kanda-kanda senior Departemen Teknik Elektro yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan yang membantu selama masa studi.
9. Seluruh pihak yang telah terlibat membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Makassar, 9 September 2024

Penulis

ABSTRAK

ALIF FADJRIN *Pemanfaatan Air Panas Pincara Untuk Pembangkit Listrik Skala Kecil Sistem Organic Rankine Cycle (ORC) Di Kab. Luwu Utara* (dibimbing oleh Salama Manjang dan Indar Chaerah Gunadin)

Peningkatan kebutuhan energi listrik dan keterbatasan cadangan bahan bakar fosil mendorong pencarian sumber energi alternatif, seperti energi panas bumi. Indonesia memiliki potensi panas bumi dengan suhu hidrothermal tinggi di atas 225 °C dan sedang antara 125 – 225 °C. Penelitian ini mengeksplorasi pemanfaatan sumber air panas di Kabupaten Luwu Utara sebagai sumber energi terbarukan melalui siklus Rankine organik (*Organic Rankine Cycle, ORC*), yang memanfaatkan sumber panas suhu rendah hingga sedang untuk menghasilkan energi listrik menggunakan fluida kerja organik. Penelitian bertujuan untuk merancang pembangkit listrik ORC skala kecil, memahami mekanisme kerjanya, serta menganalisis efisiensi dan daya yang dihasilkan. Metode penelitian meliputi pengukuran temperatur sumber air panas, analisis termofisika fluida kerja, simulasi dan analisis termal, dan pemodelan fisik sistem menggunakan *software Matlab Simulink* yang terhubung dengan database fluida *Refprop*. Hasil penelitian menunjukkan desain pembangkit ORC dengan kapasitas 10 kW menggunakan fluida kerja *R245fa*, memanfaatkan panas geotermal dengan komponen utama seperti evaporator, turbin, pompa, dan kondensor. Mekanisme kerja ORC meliputi pemompaan fluida, pemanasan di evaporator, ekspansi di turbin yang menghasilkan energi listrik, dan kondensasi di kondensor. Analisis termal menunjukkan daya yang dapat dibangkitkan sebesar 13 hingga 15 kW dengan efisiensi 11% - 12% panas yang dapat diubah ke daya, sementara hasil simulasi menunjukkan daya output yang dapat dicapai sistem 10 hingga 11 kW. Ketidaksesuaian antara analisis termal dan simulasi disebabkan analisis termal dilakukan dalam keadaan *steady state* sedangkan simulasi mempertimbangkan pemodelan komponen sehingga ada kemungkinan terjadinya hilang panas dan penurunan tekanan dalam sistem. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam penyediaan sumber energi yang murah dan ramah lingkungan.

Kata Kunci : Panas Bumi, ORC, Energi Terbarukan, *R245fa*, Efisiensi Energi, Analisis Termal, Simulasi.

ABSTRACT

ALIF FADJRIN *Utilization of Pincara Hot Water for Small Scale Power Generation using Organic Rankine Cycle (ORC) System in North Luwu Regency (supervised by Salama Manjang and Indar Chaerah Gunadin)*

The increasing demand for electricity and limited fossil fuel reserves drive the search for alternative energy sources, such as geothermal energy. Indonesia possesses geothermal potential with high hydrothermal temperatures above 225 °C and moderate temperatures between 125 – 225 °C. This study explores the utilization of hot water sources in North Luwu Regency as a renewable energy source through the Organic Rankine Cycle (ORC), which utilizes low to moderate temperature heat sources to generate electricity using organic working fluids. The research aims to design a small-scale ORC power plant, understand its operation mechanism, and analyze the efficiency and power generated. Research methods include measuring the temperature of the hot water source, thermophysical analysis of the working fluid, thermal simulation and analysis, and physical system modeling using Matlab Simulink software connected to the Refprop fluid database. The research results indicate the design of a 10 kW ORC generator using R245fa as the working fluid, utilizing geothermal heat with main components such as evaporator, turbine, pump, and condenser. The ORC operation mechanism involves fluid pumping, heating in the evaporator, expansion in the turbine generating electricity, and condensation in the condenser. Thermal analysis shows a power output of 3 kW with an efficiency of 11%-12% of heat converted to power, while simulation results indicate an output power of only 1 kW. The discrepancy between thermal analysis and simulation is due to steady-state thermal analysis versus component modeling in simulations, potentially leading to heat loss and pressure drop in the system.

Keywords: Geothermal Energy, ORC, Renewable Energy, R245fa, Energy Efficiency, Thermal Analysis, Simulation.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Dan Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Panas Bumi	4
2.2 Termodinamika	5
2.3 Hukum Termodinamika	5
2.3.1 Hukum ke – Nol Termodinamika	5
2.3.2 Hukum Pertama Termodinamika	5
2.3.3 Hukum Kedua Termodinamika	6
2.4 Siklus Termodinamika	7
2.4.1 Suhu	7
2.4.2 Tekanan	7
2.4.3 Volume Spesifik	8
2.5 Sistem Termodinamika	9
2.5.1 Sistem Tertutup	9
2.5.2 Sistem Terbuka	10
2.5.3 Sistem Terisolasi	11
2.6 Perubahan Fasa	11
2.6.1 Cairan <i>Subcooled (Compressed Liquid)</i>	11
2.6.2 Cairan Jenuh (<i>Saturated Liquid</i>)	11
2.6.3 Uap Jenuh (<i>Saturated Vapor</i>)	12
2.6.4 Fase Uap-Cair (<i>Liquid-Vapor Phase</i>)	12
2.6.5 Uap Panas Lanjutan (<i>Superheated Vapor</i>)	12
2.7 Rankine Cycle	13
2.8 Organic Rankine Cycle	14
2.9 Analisis Termal	16
2.9.1 Point 1 (Outlet Kondesor – Inlet Pompa)	16
2.9.2 Point 2 (Outlet Pompa – Inlet Evaporator)	16
2.9.3 Point 3 (Outlet Evaporator – Inlet Turbin)	17
2.9.4 Point 4 (Outlet Turbin – Inlet – Kondensor)	17
2.9.5 Evaporator	17

2.9.6 Turbin.....	18
2.9.7 Kondensor.....	18
2.9.8 Pompa	19
2.9.9 Daya Output Siklus.....	19
2.9.10 Efisiensi Termal.....	19
2.9.11 Laju Aliran Massa	20
2.10 Penukar Panas Tipe Pelat Rangka	20
2.11 Refrigeran R245fa	21
2.12 Refprop	22
2.13 Matlab R2022a	23
2.14 Simulink.....	23
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	24
3.1 Judul Penelitian.....	24
3.2 Peralatan Yang Digunakan.....	24
3.3 Prosedur Penelitian	25
3.3.1 Studi Literatur.....	25
3.3.2 Metode Pengumpulan Data	25
3.3.3 Metode Analisis Data.....	25
3.4 Diagram Alur Penelitian	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian.....	27
4.2 Potensi Pembangkit Di Lokasi Penelitian	28
4.2.1 Peningkatan Ekonomi Lokal	29
4.2.2 Dukungan Terhadap Pariwisata	29
4.2.3 Keandalan Pasokan Energi	29
4.3 Hasil Pengukuran.....	30
4.3.1 Karakteristik Fluida Kerja <i>R245fa</i>	31
4.3.2 Hasil Analisis Termal.....	36
4.4 Pemodelan Sistem.....	41
4.4.1 Parameter Komponen ORC	41
4.5 Blok Komponen <i>Simulink Matlab R2022a</i>	43
4.5.1 Blok <i>Condenser-Evaporator (2P-TL)</i>	43
4.5.2 Blok <i>Volumetric Displacement Pump (2P-TL)</i>	45
4.5.3 Blok Turbin (2P-TL).....	46
4.5.4 Blok <i>Two Phase Fluid Properties (2P)</i>	47
4.5.5 Blok Accumulator (2P).....	48
4.6 Simulasi Rancangan	49
4.7 Output Simulasi	49
4.7.1 Output Simulasi Reservoir.....	50
4.7.2 Output Simulasi Mata Air.....	51
4.8 Hasil Analisis Termal dan Output Simulasi	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sistem termodinamika.....	9
Gambar 2. Contoh sistem tertutup	10
Gambar 3. Contoh sistem terbuka.....	10
Gambar 4. Contoh sistem terisolasi	11
Gambar 5. Diagram t-v pemanasan air pada tekanan konstan	12
Gambar 6. Komponen siklus rankine sederhana.....	13
Gambar 7. Diagram temperatur-entropi siklus rankine	13
Gambar 8. Rancangan listrik orc menggunakan sumber air panas sebagai sumber panas. Sumber : Pikra dkk., (2015).....	15
Gambar 9. Struktur penukar panas tipe plat rangka Sumber : Saari, Heat Exchanger Dimensioning, (2010).....	21
Gambar 10. Susunan aliran fluida (counter flow) plate heat exchanger Sumber : Saari, Heat Exchanger Dimensioning, (2010)	21
Gambar 11. Refrigeran r245fa	21
Gambar 12. Diagram alur penelitian.....	26
Gambar 13. Lokasi desa pincara kec. masamba kab. luwu utara Sumber : Google Maps	27
Gambar 14. Model panas bumi daerah Pincara Sumber : Geologi Daerah Pincara, Masamba, kab. Luwu Utara Sulawesi Selatan (2005).....	28
Gambar 15. Sosialisasi pembangkit orc di kantor desa pincara	28
Gambar 16. Reservoir geothermal, Gambar 17. Mata air geothermal	30
Gambar 18. Pembangkit geothermal orc.....	41
Gambar 19. Model geometri plate heat exchanger	42
Gambar 20. Blok condenser-evaporator (2p-tl)	43
Gambar 21. Parameter blok condenser-evaporator (tl-2p) simulink.....	44
Gambar 22. Blok pump (2p-tl).....	45
Gambar 23. Parameter blok pump (2p) simulink.....	45
Gambar 24. Blok turbine (2p)	46
Gambar 25. Parameter blok turbine (2p) simulink.....	46
Gambar 26. Blok two phase fluid properties (2p).....	47
Gambar 27. Parameter blok two-phase fluid properties (2p) simulink dari database refprop untuk fluida kerja r245fa.....	47
Gambar 28. Blok accumulator (2p).....	48
Gambar 29. Parameter blok receiver accumulator (2p) simulink	48
Gambar 30. Layout rancangan sistem orc pada software matlab simulink.....	49
Gambar 31. Grafik daya output – temperatur, Gambar 32. Grafik tekanan - temperatur reservoir reservoir.....	50
Gambar 33. Grafik tekanan – turbin speed, Gambar 34. Grafik level tank reservoir fluida r245fa.....	50
Gambar 35. Grafik daya output – temperatur, Gambar 36. Grafik tekanan – temperatur mata air mata air	51
Gambar 37. Grafik tekanan – turbin speed, Gambar 38. Grafik level tank mata air fluida kerja r245fa.....	51

Gambar 39. Efisiensi sistem terhadap temperatur reservoir dan mata air geotermal	52
Gambar 40. Diagram p-h karakteristik fluida kerja r245fa pada simulasi	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Satuan tekanan.....	8
Tabel 2. Properti cairan r245fa.....	22
Tabel 3. Data pengukuran temperatur reservoir	30
Tabel 4. Data pengukuran temperatur mata air	31
Tabel 5. karakteristik fluida kerja berdasarkan data temperatur reservoir	32
Tabel 6. karakteristik fluida kerja berdasarkan data temperatur mata air	32
Tabel 7. Kinerja komponen pembangkit di lokasi penelitian.....	33
Tabel 8. Data temperatur-entalpi reservoir (pagi)	33
Tabel 9. Data temperatur-entalpi reservoir (sore)	34
Tabel 10. Data temperatur-entalpi mata air (pagi)	35
Tabel 11. Data temperatur-entalpi mata air (sore).....	35
Tabel 12. Data output analisis termal pada reservoir (pagi).....	37
Tabel 13. Data output analisis termal pada reservoir (sore)	38
Tabel 14. Data output analisis termal pada mata air (pagi).....	39
Tabel 15. Data output analisis termal pada mata air (sore)	40
Tabel 16. Spesifikasi komponen pembangkit orc	41
Tabel 17. Data geometri plate heat exchanger	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Lapangan	58
Lampiran 2. Kode pemrograman matlab r2023a dalam analisis termal dan parameter simulasi	90
Lampiran 3. Data sheet pompa.....	94

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Q	Kalor yang dipindahkan
ΔU	Perubahan energi dalam
W	Kerja yang dilakukan dalam satuan kalor
T	Suhu absolut (K)
T°_F	Suhu dalam derajat Farenheit ($^{\circ}F$)
T°_R	Suhu dalam skala Rankine ($^{\circ}C$)
F	Gaya yang diterapkan
A	Area di mana gaya diterapkan
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i>
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HFC	<i>Hidro Flouro Carbon</i>
Atm	Atmosfer
Pa	<i>Pascal</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
p	Tekanan
v	Volume
w	Watt
h	Entalpi
J	Joule
Kg	Kilogram
<i>R245fa</i>	<i>Pentafluoropropane</i>
PHE	<i>Plate Heat Exchanger</i>
$\dot{Q}_{\text{Evap}}$	Laju perpindahan panas pada evaporator (W)
$\dot{W}_{\text{Turb}}$	Kerja yang dihasilkan turbin (W)
$\dot{Q}_{\text{Cond}}$	Laju perpindahan panas pada kondensor (W)

$\dot{W}_{\text{Pump}}$	Kerja yang dilakukan Pompa (W)
$\dot{W}_{\text{Net}}$	Daya Output (W)
η_{net}	Effisiensi total siklus (%).
$\dot{m}$	Laju aliran massa (kg/s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini kebutuhan akan sumber energi listrik kian meningkat disebabkan semakin banyaknya perangkat elektronik yang digunakan dalam kehidupan masyarakat. Konsumsi listrik di bidang industri juga kian meningkat seiring pertumbuhan jumlah pelanggannya. Jumlah cadangan fosil yang tersisa juga diperkirakan menipis dan tidak menutup kemungkinan akan habis suatu saat nanti. Pembangkit listrik kebanyakan juga masih menggunakan bahan bakar fosil dalam proses pembangkitan energinya. Untuk itu perlunya mencari Sumber energi alternatif terbarukan salah satunya energi panas bumi (*geothermal*).

Panas bumi di Indonesia umumnya memiliki suhu *Hydrothermal* yang bersuhu tinggi diatas 225 °C dan beberapa lokasi yang memiliki suhu sedang antara 125 – 225 °C. salah satu tanda dari kehadiran *hydrothermal* ini yakni sering ditunjukkan dengan adanya mata air panas, *geyser*, kolam lumpur, *streaming ground* maupun batuan ubahan pada lokasi tersebut. Sumber air panas dapat terjadi akibat pemanasan air dalam tanah karena aktivitas vulkanik di dalam tanah atau gunung berapi yang aktif. Melihat potensi energi panas yang dimiliki oleh sumber mata air panas, terdapat peluang untuk memanfaatkannya sebagai sumber energi terbarukan guna memenuhi kebutuhan suplai energi listrik. Pemanfaatan energi panas tersebut dapat menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan serta bersifat terbarukan.

Berdasarkan kondisi yang telah dipaparkan, diperlukan suatu teknologi yang mampu mengambil manfaat dari sumber air panas yang tersedia dan mengkonversinya menjadi energi listrik yang ramah lingkungan serta dapat diperbaharui. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menerapkan siklus Rankine organik (*Organic Rankine Cycle*) yang dirancang khusus untuk memanfaatkan energi panas dengan suhu rendah. *Organic Rankine Cycle* atau ORC merupakan sistem yang memanfaatkan hampir semua sumber panas bersuhu rendah

hingga sedang (60 – 350 °C) untuk menghasilkan tenaga. Sistem ini menggunakan zat organik sebagai fluida kerja untuk memanfaatkan sumber panas tingkat rendah dan terdiri dari evaporator (area pemanas), turbin, pompa, dan kondensor (area pendingin). Pembangkit listrik *ORC* yang menggunakan skala komersial dengan sumber mata air panas telah dilakukan di beberapa negara. Untuk di Indonesia sendiri pemanfaatan sumber air panas yang akan menjadi objek penelitian berada di Kabupaten Luwu Utara tepatnya di desa Pincara, Kabupaten Luwu Utara, Masamba. Penelitian ini diharapkan dapat menyediakan sumber energi yang murah dan ramah lingkungan.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan maka akan dilakukan penelitian dengan judul **Pemanfaatan air panas Pincara untuk pembangkit listrik skala kecil sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara.**

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana rancang bangun pembangkit listrik skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara.
2. Bagaimana mekanisme kerja pembangkit listrik skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara.
3. Bagaimana pengujian serta Analisis Daya dan Efisiensi dari pembangkit listrik skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui rancangan dari pembangkit listrik panas bumi skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara
2. Mengetahui dan memahami mekanisme kerja pembangkit listrik panas bumi skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara
3. Mengetahui tingkat efisiensi serta analisis daya pada pembangkit listrik panas bumi skala kecil sistem *Organik Rankine Cycle (ORC)* di Kab. Luwu Utara.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini :

1. Secara akademis diharapkan penelitian ini dapat bemanfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan Sistem *Organic rankine Cycle (ORC)* di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
2. Secara Praktis, penelitian ini diharapkan bermanfaat pada masyarakat sekitar di desa Pincara Kab. luwu Utara.

1.5 Ruang Lingkup Dan Batasan Masalah

1. Penelitian ini bertempat di Desa Pincara Kabupaten Luwu Utara, Masamba.
2. Untuk desain pembangkit di lokasi penelitian, kapasitas daya yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit sebesar 10 kW.
3. Fluida kerja yang digunakan pada pembangkit adalah *R245fa (Pentaflouropropane)*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Panas Bumi

Potensi energi panas bumi sangat besar diperkirakan bahwa, selama setahun, lebih dari 100 juta GWh energi panas setara dengan energi panas yang disalurkan dari interior bumi ke permukaan. Tetapi energi panas bumi cenderung menyebar secara relatif, sebuah fenomena yang membuatnya sulit untuk dimanfaatkan. Panas bumi sendiri memusatkan panas pada daerah-daerah tertentu yang biasanya daerah-daerah yang terkait dengan batas-batas lempeng tektonik di kerak bumi dan ini membuat energi panas bumi berguna sebagai sumber panas untuk penggunaan langsung atau produksi listrik menggunakan teknologi saat ini. Sumber daya panas bumi belum mendapat banyak fokus dalam gambaran energi secara keseluruhan. Hal ini terlepas dari kenyataan bahwa penggunaan langsung energi panas bumi adalah hal yang biasa di beberapa negara (DiPippo, 2012).

Energi panas bumi di Indonesia mulai dikembangkan sejak tahun 1970-an. Namun, program pengembangan energi panas bumi tidak optimal karena tergeser oleh pengembangan energi fosil. Hal ini cukup disayangkan karena Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia. Dewasa ini, ada tiga macam cara untuk mendapatkan energi dari panas bumi, yaitu dengan *dry steam*, *flash steam*, dan *binary*. *Dry steam* plants dilakukan dengan mengambil uap panas bumi dan langsung digunakan untuk menggerakkan turbin yang memutar generator penghasil listrik. *Flash plant* dilakukan dengan mengambil air panas, biasanya bersuhu lebih dari 200°C dari tanah yang mendidih pada saat naik ke permukaan, kemudian dipisahkan antara air panas dan uap panas yang dialirkan ke turbin. Sementara dengan *binary plants*, air panas mengalir melalui *heat exchangers*, untuk mendidihkan cairan organik yang memutar turbin. Uap panas yang dimampatkan dan sisa dari cairan panas bumi dari ketiga cara di atas disuntikkan lagi ke batuan panas agar kembali menghasilkan panas. Cara kerja inilah yang membuat energi panas bumi dikategorikan sebagai energi terbarukan (Ermawati & Negara, 2014).

2.2 Termodinamika

Menurut (Rauf, 2020) Istilah "termodinamika" berasal dari dua akar kata "*thermo*" yang berarti panas, dan "*dynamic*" yang berarti energi yang bergerak, atau daya. Termodinamika menjelaskan hubungan antara kerja, panas, dan bentuk energi lainnya. (Kutz, 2014)

Termodinamika adalah satu cabang dari fisika dinamika, yang mempelajari tentang perilaku gerakan energi dan materi, termasuk panas atau kalor (*heat, thermal*) sebagai tenaga atau energi, dan juga mencakup dinamika fluida (*fluid dynamics*) yang mempelajari tentang aliran fluida (*fluid flow*), seperti gas, udara, air, dan benda bergerak di dalamnya, materi ataupun energi (Warokka & Boedi, 2020).

2.3 Hukum Termodinamika

2.3.1 Hukum ke – Nol Termodinamika

Hukum ini menyatakan : Jika objek A dan B secara terpisah berada dalam kesetimbangan termal dengan objek ketiga C, maka objek A dan B berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain.

Suhu sebagai properti yang menentukan apakah suatu objek berada dalam kesetimbangan termal dengan objek lain. Dua objek dalam kesetimbangan termal satu sama lain berada pada suhu yang sama. Sebaliknya, jika dua objek memiliki suhu yang berbeda, maka mereka tidak berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain. Kesetimbangan termal adalah situasi di mana dua objek dalam kontak termal satu sama lain berhenti untuk bertukar energi melalui proses panas. Kita dapat merangkum hasil ini dalam pernyataan yang dikenal sebagai hukum Termodinamika ke-nol (hukum kesetimbangan).

2.3.2 Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika adalah generalisasi hukum kekekalan energi yang mencakup perubahan energi internal. Ini adalah hukum yang berlaku secara universal yang dapat diterapkan pada banyak proses. Hukum Ini menyatakan energi tidak pernah bisa diciptakan atau dimusnahkan. Energi dapat ditransformasikan dari

satu bentuk ke bentuk lainnya, tetapi energi total dari sistem yang terisolasi selalu konstan.

Dari sudut pandang universal, kita dapat mengatakan bahwa energi total alam semesta adalah konstan. Jika salah satu bagian alam semesta memperoleh energi dalam beberapa bentuk, maka bagian lain harus kehilangan jumlah energi yang sama (Halliday dkk., 2011).

Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan, ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur, sehingga secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q = \Delta U + W \quad (1)$$

dimana :

Q = kalor yang dipindahkan (J)

ΔU = perubahan energi dalam (J)

W = kerja yang dilakukan dalam satuan kalor (J)

2.3.3 Hukum Kedua Termodinamika

Claussius menyatakan bahwa mesin yang bekerja dalam proses siklik tidak dapat mentransfer panas dari benda dengan temperatur lebih rendah ke benda dengan temperatur lebih tinggi tanpa bantuan pihak luar. Artinya, panas tidak bisa mengalir secara spontan dari lingkungan yang lebih dingin ke lingkungan yang lebih panas tanpa adanya intervensi eksternal.

Kemudian, Kelvin Planck menyatakan bahwa tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam proses siklik dengan tujuan utama mengkonversi semua energi panas menjadi energi kerja. Dengan kata lain, tidak ada mesin panas yang dapat sepenuhnya merubah seluruh energi panas yang diberikan ke dalam bentuk kerja mekanik. Terdapat penurunan energi dalam proses menghasilkan kerja mekanik dari panas.

Kedua pernyataan ini mencerminkan hukum kedua termodinamika dan sering disebut sebagai hukum degradasi energi. Hukum ini menunjukkan bahwa dalam

proses-proses termal, terjadi penurunan kualitas energi karena sebagian energi panas tidak dapat sepenuhnya diubah menjadi energi kerja mekanik (Asy'ari, 2019).

2.4 Siklus Termodinamika

Siklus termodinamika adalah serangkaian proses di mana sifat-sifat sistem sama setelah siklus seperti sebelumnya. Tiga sifat utama yang dilacak ketika suatu sistem mengalami serangkaian proses adalah:

1. Suhu,
2. Tekanan, dan
3. Volume spesifik (Zohuri, 2017).

2.4.1 Suhu

Suhu dapat didefinisikan secara kualitatif sebagai ukuran panasnya suatu benda. Suhu adalah properti yang menentukan apakah suatu sistem berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem lain. Jika suhu dua benda yang saling kontak termal adalah sama, maka tidak akan ada transfer bersih energi termal. Satuan suhu lainnya juga umum digunakan, termasuk skala suhu *celsius*, *fahrenheit*, dan *rankine*. Persamaan konversi untuk ini diberikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T &= t + 273,15 \\ T^{\circ}F &= 1,81 + 32 \\ T^{\circ}R &= T^{\circ}F + 459,67 \end{aligned} \tag{2}$$

dimana :

t = suhu dalam derajat Celcius ($^{\circ}C$)

T = suhu absolut (K)

$T^{\circ}F$ = suhu dalam derajat Farenheit ($^{\circ}F$)

$T^{\circ}R$ = suhu dalam skala Rankine ($^{\circ}R$) (Kutz, 2014).

2.4.2 Tekanan

Tekanan didefinisikan sebagai gaya yang diterapkan per satuan luas. Simbol yang digunakan untuk tekanan adalah p . Rumus untuk tekanan adalah:

$$p = \frac{F}{A} \quad (3)$$

dimana :

F = Gaya yang diterapkan (N)

P = Tekanan (Pa)

A = Area di mana gaya diterapkan (m²)

Ada sejumlah satuan yang digunakan secara umum untuk mengukur tekanan. Satuan umum untuk tekanan, dalam SI, atau sistem Metrik adalah N/m², Pa (*Pascals*), kPa, atau MPa. Satu Pascal sama dengan 1-N/m². Satuan umum untuk tekanan, dalam sistem AS, atau Imperial, adalah psi, atau lbf/in², psia (*psi-absolute*) atau psig (*psi-gage*).

Tabel 1. Satuan tekanan

	Pascal (Pa)	(bar) (bar)	atmos. (atm)	torr (Torr)	psi (psi)
1 Pa	1 N/m²	10 ⁻⁵	1.0197x10 ⁻⁵	7.5006x10 ⁻⁶	145.04x10 ⁻⁶
1 bar	100,000	<i>Approx.</i> 106 dyn/cm ²	1.0197	750.06	14.50377
1 atm	98,066.50	0.980665	<i>Approx.</i> 1 kgf/cm ²	735.56	14.223
1 atm	101,325	1.01325	1.0332	760	14.696
1 torr	133.322	1.3332x10 ⁻³	1.3595x10 ⁻³	<i>Approx.</i> 1 Torr; mmHg	19.337x10 ⁻³
1 psi	6.894x10 ³	68.948x10 ⁻³	70.307x10 ⁻³	51.715	1 lbf/in²

Sumber : Rauf, *Thermodynamics Made Simple for Energy Engineers* (2020)

2.4.3 Volume Spesifik

Volume Spesifik adalah kebalikan dari densitas. Densitas didefinisikan sebagai massa per satuan volume. Simbol untuk Densitas adalah: ρ (*Rho*). Simbol untuk volume spesifik adalah " v ," (*upsilon*). Rumus untuk volume spesifik, v , adalah :

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

dimana :

v = Volume spesifik (m^3/kg)

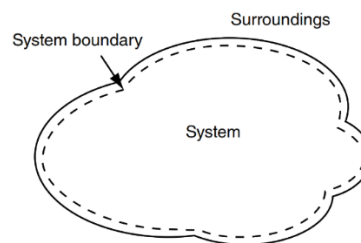
ρ = Densitas (kg/m^3)

Satuan untuk volume spesifik adalah sebagai berikut:

1. Satuan AS (Imperial): v diukur dalam cu-ft/lbm atau ft^3/lbm .
2. Satuan SI (Metrik): v diukur dalam m^3/kg (Rauf, 2020).

2.5 Sistem Termodinamika

Sistem termodinamika, sering hanya disebut sistem, dapat berupa bagian materi atau wilayah ruang yang kita identifikasi untuk tujuan analisis. Lingkungan sekitar (*Surrounding*) adalah segala sesuatu di luar sistem. Batas (*Boundary*) sistem adalah permukaan yang memisahkan sistem dari lingkungan.



Gambar 1. Sistem termodinamika

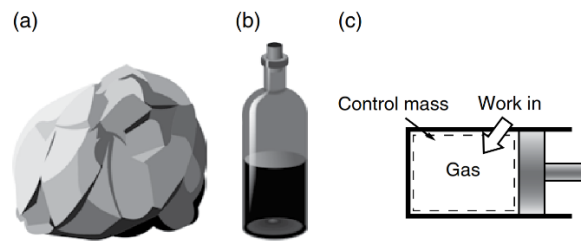
Sumber : Candra, *Energy, Entropy and Engines* (2016)

Sistem termodinamika berinteraksi dengan lingkungannya dengan bertukar massa, energi atau keduanya. Metode analisis kita akan tergantung pada apa yang melintasi batas sistem. Kita mendefinisikan tiga jenis sistem di bawah ini.

2.5.1 Sistem Tertutup

Jumlah massa dalam sistem tertutup adalah tetap dan tidak ada massa yang melintasi batas sistem. Namun, energi dalam bentuk panas atau kerja dapat masuk atau keluar dari sistem. Sistem tertutup juga disebut massa kontrol. Meskipun massa sistem tertutup adalah tetap, volumenya tidak tetap dan dapat dimampatkan atau diperluas. Sebuah batu pada Gambar 2.a atau botol tertutup pada Gambar 2.b adalah contoh sistem tertutup, dan begitu juga massa gas tetap yang terkandung dalam silinder yang dilengkapi dengan piston pada Gambar 2.c. Ketika piston

bergerak untuk memampatkan gas, piston melakukan kerja dan batas massa kontrol bergerak, tetapi gas tetap berada di dalam sistem.

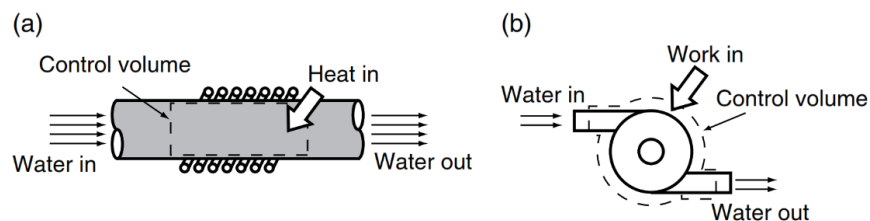


Gambar 2. Contoh sistem tertutup

Sumber : Candra, *Energy, Entropy and Engines* (2016)

2.5.2 Sistem Terbuka

Baik energi maupun massa dapat melintasi batas-batas sistem terbuka, yang juga dikenal sebagai volume kontrol. Batas-batas volume kontrol dapat berubah bentuk dan sistem juga dapat bergerak dalam ruang. Contoh umum volume kontrol adalah perangkat industri seperti penukar panas, pompa, turbin dan boiler. Massa secara konstan mengalir ke dalam dan keluar dari mesin-mesin ini, sementara energi dalam bentuk massa dan energi melintasi batas-batas sistem. Gambar 3.a menunjukkan bagian dari pipa air yang dililit oleh koil pemanas. Garis putus-putus di sekitar bagian yang dipanaskan adalah volume kontrol. Air mengalir masuk dan keluar dari bagian ini, sementara panas ditambahkan ke dalamnya. Gambar b adalah contoh lain dari volume kontrol, yaitu sebuah pompa pada Gambar 3.b. Air mengalir melalui pompa dan kerja ditransfer dari lingkungan ke volume kontrol saat poros pompa berputar.



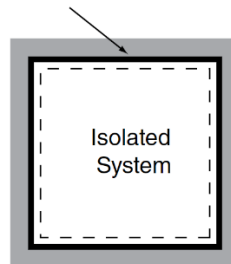
Gambar 3. Contoh sistem terbuka

Sumber : Candra, *Energy, Entropy and Engines* (2016)

2.5.3 Sistem Terisolasi

Jika tidak ada massa atau energi yang melintasi batas-batas sistem, maka sistem itu tidak berinteraksi, dalam pengertian termodinamika, dengan lingkungannya dan dikenal sebagai sistem yang terisolasi. Sifat-sifat sistem yang terisolasi setelah berada pada kesetimbangan, tidak akan pernah berubah. Sebuah wadah yang tertutup rapat dan terisolasi sempurna dengan dinding yang kaku dan kedap (yang tidak dapat dilalui materi) adalah contoh dari sistem yang terisolasi (Candra, 2016).

Dinding yang kaku, terisolasi sempurna dan kedap air



Gambar 4. Contoh sistem terisolasi

Sumber : Candra, *Energy, Entropy and Engines* (2016)

2.6 Perubahan Fasa

Air dapat bercampur antara cairan dan uap, misalnya pada boiler dan kondensor pada pembangkit listrik tenaga uap. Berikut ini, perubahan fase zat murni, seperti air, yang akan dijelaskan lebih rinci pada bagian berikut.

2.6.1 Cairan *Subcooled* (*Compressed Liquid*)

Ketika suhu cairan kurang dari titik didihnya, pada tekanan tertentu, itu disebut dalam keadaan atau fase subcooled. Contoh : air pada suhu kamar (77 °F, 25 °C), di permukaan laut (1 atm atau 1 bar), dianggap *subcooled*, dalam hal itu, penambahan sedikit panas tidak akan menyebabkan air mendidih.

2.6.2 Cairan Jenuh (*Saturated Liquid*)

Apabila suhu cairan hampir mencapai titik didihnya, sehingga penambahan sedikit energi panas akan menyebabkan cairan mendidih, maka cairan tersebut

dikatakan jenuh. Dengan kata lain, cairan itu jenuh dengan panas dan tidak dapat menerima panas tambahan tanpa menguap menjadi fase uap. Contoh : air pada suhu 212 °F, atau 100 °C di permukaan laut.

2.6.3 Uap Jenuh (Saturated Vapor)

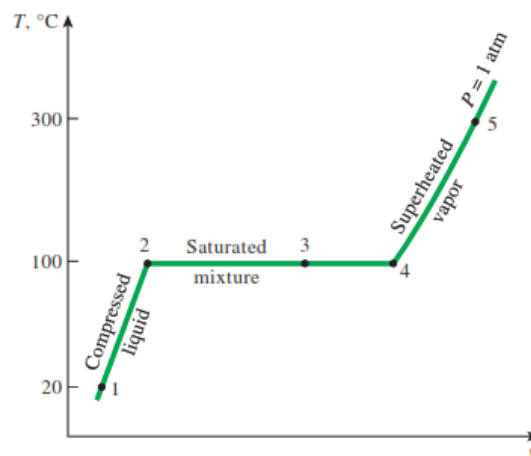
Uap yang telah mendingin hingga hampir mencapai titik didih, atau titik jenuh, dan di ambang kondensasi, disebut uap jenuh.

2.6.4 Fase Uap-Cair (*Liquid-Vapor Phase*)

Suatu zat dikatakan berada dalam fase uap-cair apabila suhunya sama atau sedikit lebih besar daripada nilai suhu jenuh yang sesuai dengan tekanannya. Ketika air berada dalam fase uap-cair, dalam banyak kasus, sebagian dari total volume air telah menguap sedangkan bagian yang tersisa berada dalam keadaan air jenuh.

2.6.5 Uap Panas Lanjutan (*Superheated Vapor*)

Uap panas Lanjutan adalah uap yang telah menyerap panas melebihi titik didihnya. Kehilangan sejumlah kecil panas akan menyebabkan uap mengembun atau terkondensasi (Rauf, 2020).

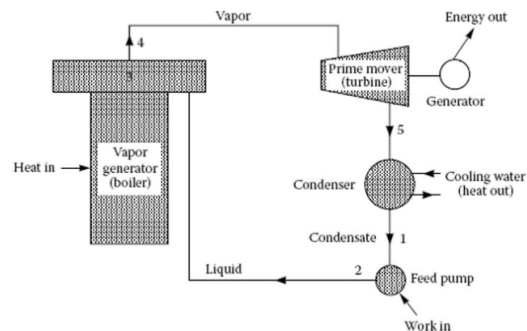


Gambar 5. Diagram t-v pemanasan air pada tekanan konstan

Sumber : A. Cengel & A. Boles, *THERMODYNAMICS 8th ed* (2015)

2.7 Rankine Cycle

Siklus Rankine adalah siklus uap yang terdiri dari empat proses : penguapan tekanan konstan, ekspansi isentropik, kondensasi tekanan konstan, dan kembali ke kondisi awal siklus. Elemen-elemen dasar dari siklus Rankine dasar adalah pompa, boiler, turbin dan kondensor. Siklus Rankine adalah mesin panas yang paling populer untuk menghasilkan daya listrik secara komersial (Irving dkk., 2015).

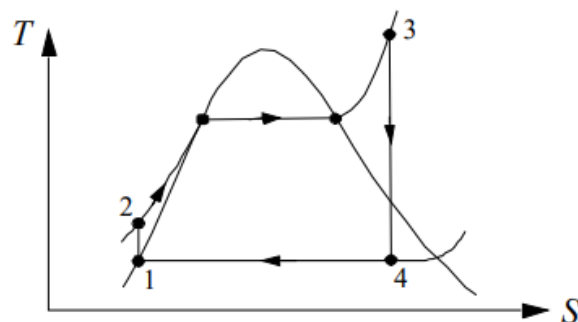


Gambar 6. Komponen siklus rankine sederhana

Sumber : Irving, dkk. *Thermodynamics and Heat Power* 9th ed. (2015).

Siklus Rankine dasar terdiri dari empat proses berikut ini:

1. 1-2 kompresi isentropik
2. 2-3 penambahan panas isobarik
3. 3-4 ekspansi isentropik
4. 4-1 penghilangan panas isobarik



Gambar 7. Diagram temperatur-entropi siklus rankine

Sumber : Whu, *Thermodynamic And Heat Powered Cycle* (2007)

Air memasuki pompa pada keadaan 1 sebagai cairan jenuh bertekanan rendah untuk menghindari masalah kavitasi (kerusakan pada pompa) dan keluar pada

keadaan 2 sebagai cairan bertekanan tinggi. Panas yang dipasok dalam boiler menaikkan air dari cairan terkompresi pada keadaan 2 ke cairan jenuh ke uap jenuh dan ke uap super panas suhu yang jauh lebih tinggi pada keadaan 3. Uap super panas pada keadaan 3 memasuki turbin di mana ia mengembang ke keadaan 4 *Superheating* menggerakkan proses ekspansi isentropik ke kanan pada diagram t-s seperti yang ditunjukkan pada gambar sehingga mencegah kadar air yang tinggi dari uap saat keluar dari turbin pada keadaan 4 sebagai campuran jenuh. Uap buangan dari turbin memasuki kondensor pada keadaan 4 dan dikondensasi pada tekanan konstan ke keadaan 1 sebagai cairan jenuh untuk masuk ke dalam pompa dan menyelesaikan siklus (Whu, 2007).

2.8 Organic Rankine Cycle

Organic Rankine Cycle (ORC) merupakan teknologi yang melibatkan konversi panas dari berbagai sumber termasuk sumber energi yang dapat diperbaharui seperti matahari, panas bumi, biomassa, atau sisa panas dari sistem pembangkit. Sistem dari *Organic Rankine Cycle* (ORC) sama dengan *rankine cycle* perbedaannya terletak pada fluida kerja yang digunakan, *ORC* menggunakan cairan organik (refrigeran dan hidrokarbon) untuk menggantikan air yang digunakan pada sistem konvensional siklus rankine (Vega Nugraha & Tk, 2015). Keuntungan yang disajikan oleh air sebagai fluida kerja adalah :

1. Stabilitas termal/kimia yang sangat baik (tidak ada risiko dekomposisi)
2. Viskositas yang sangat rendah (beban pemompaan yang diperlukan lebih sedikit)
3. Pembawa energi yang baik (panas laten dan spesifik yang tinggi)
4. Tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak mengancam lingkungan (nol ODP, nol GWP)
5. Murah dan berlimpah

Namun demikian, banyak masalah yang dihadapi ketika menggunakan air sebagai fluida kerja:

1. Kebutuhan superheating untuk mencegah kondensasi selama ekspansi
2. Risiko erosi bilah turbin (kavitasi)
3. Tekanan berlebih dalam evaporator

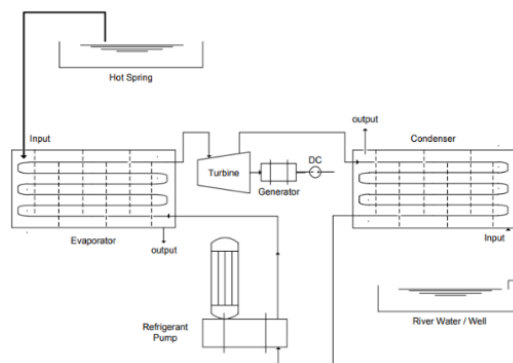
4. Turbin yang kompleks dan mahal.

Karena alasan-alasan tersebut di atas, air lebih cocok untuk aplikasi suhu tinggi dan sistem terpusat skala besar. Masalah yang dihadapi dengan air dapat dikurangi sebagian dengan memilih cairan yang sesuai. Senyawa organik yang dimaksud dicirikan oleh massa molekul yang lebih tinggi dan temperatur *ebullition* kritis yang lebih rendah daripada air telah diusulkan dalam apa yang disebut *Organic Rankine Cycles* (Gunadin Indar, 2023).

Menurut (Tchanche dkk., 2011) Siklus Rankine Organik memiliki beberapa keunggulan dibandingkan pembangkit listrik tenaga uap konvensional :

1. Lebih sedikit panas yang dibutuhkan selama proses penguapan.
2. Proses penguapan berlangsung pada tekanan dan suhu yang lebih rendah.
3. Proses ekspansi berakhir di daerah uap dan karenanya superheating tidak diperlukan dan risiko erosi bilah dihindari.
4. Perbedaan suhu yang lebih kecil antara penguapan dan kondensasi juga berarti bahwa penurunan tekanan/rasio akan jauh lebih kecil dan dengan demikian turbin satu tahap sederhana dapat digunakan.

Fluida kerja dipompa ke dalam evaporator. Fluida kerja dipanaskan dan diuapkan oleh fluida pemanas (sumber air panas) pada suhu dan tekanan konstan ke fase uap jenuh dalam tabung evaporator. Fluida kerja isentropik diekspansi hingga tekanan rendah di dalam turbin dan menggerakkan generator listrik untuk menghasilkan energi listrik. Keluaran dari fluida kerja turbin dikondensasikan di kondensor dan kemudian dipompa kembali ke evaporator (Pikra dkk., 2015).



Gambar 8. Rancangan listrik orc menggunakan sumber air panas sebagai sumber panas.
Sumber : Pikra dkk., (2015)

2.9 Analisis Termal

Kehilangan panas pada sistem tidak dapat dihindari antar komponen pembangkit dengan lingkungan sekitar, sehingga untuk memudahkan analisis maka setiap komponen yang bekerja akan dianggap beroperasi pada kondisi temperatur dan tekanan konstan (*steady state*) untuk memudahkan analisis awal. Penggunaan parameter entalpi pada setiap poin siklus digunakan untuk menggambarkan transfer energi pada fluida. Entalpi merupakan besaran termodinamika yang mewakili total energi yang dapat diserap atau dilepaskan fluida, termasuk energi panas dan energi potensial akibat temperatur dan tekanan. Dengan mengetahui entalpi di setiap titik siklus, kita dapat menghitung transfer panas yang terjadi pada fluida.

Dengan menggunakan prinsip hukum termodinamika maka kondisi fluida kerja serta perpindahan energi pada setiap komponen pembangkit dapat dijabarkan sebagai berikut.

2.9.1 Point 1 (Outlet Kondesor – Inlet Pompa)

Pada titik pertama (h_1), cairan *subcooled* di titik keluaran kondensor memiliki temperatur dan tekanan kerja yang sama dengan tekanan dan temperatur fluida kerja pada fase cair.

2.9.2 Point 2 (Outlet Pompa – Inlet Evaporator)

Pada titik kedua (h_2), entalpi keluaran pompa bergantung pada efisiensi isentropik pompa. Tekanan keluaran pompa sama dengan tekanan evaporator. Dengan mengetahui entalpi pada inlet pompa (h_{2s}), entalpi keluaran pompa dapat diketahui dengan persamaan berikut

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{Pump}} \quad (5)$$

dimana :

- h_1 = Entalpi outlet kondesor (J/kg)
- h_{2s} = Entalpi inlet pompa (J/kg)
- h_2 = Entalpi outlet pompa (J/kg)
- η_{Pump} = Efisiensi isentropik pompa (%)

2.9.3 Point 3 (Outlet Evaporator – Inlet Turbin)

Pada titik ketiga (h_3), entalpi fluida diasumsikan dalam zona *superheated* mengingat titik didih dari fluida yang rendah. Entalpi pada poin 3 tergantung pada panas yang diserap dan tekanan yang dihasilkan fluida dalam evaporator.

2.9.4 Point 4 (Outlet Turbin – Inlet – Kondensor)

Pada titik keempat (h_4), diperkirakan berdasarkan entalpi fluida di evaporator (h_3) saat berekspansi dalam turbin (h_{4s}) berdasarkan efisiensi turbin. sehingga digunakan persamaan berikut.

$$h_4 = h_3 + \eta_{Turb} (h_3 - h_{4s}) \quad (6)$$

dimana :

h_3 = Entalpi outlet evaporator (J/kg)

h_{4s} = Entalpi isentropik (J/kg)

h_4 = Entalpi outlet turbin (J/kg)

η_{Turb} = Efisiensi isentropik turbin (%)

2.9.5 Evaporator

Proses yang terjadi pada fluida kerja di evaporator terjadi secara isothermal dengan tekanan dan temperatur konstan. *Heat and pressure Loss* atau kehilangan panas dan tekanan diabaikan. Kondisi fluida pada evaporator berada pada fase uap jenuh (*superheated*), sehingga energi panas yang diekstraksi oleh fluida kerja pada evaporator dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{Q}_{Evap} = \dot{m} (h_3 - h_2) \quad (7)$$

dimana :

$\dot{Q}_{Evap}$ = Laju perpindahan panas pada evaporator (W)

$\dot{m}$ = Laju Aliran Fluida (kg/s)

h_3 = Entalpi outlet evaporator (J/kg)

h_2 = Entalpi outlet pompa (J/kg)

2.9.6 Turbin

Proses yang terjadi pada turbin adalah ekspansi isentropik yang digunakan untuk menghasilkan daya. Besarnya daya yang dapat dibangkitkan turbin pada kondisi isentropik didasarkan pada efisiensi turbine itu sendiri. efisiensi turbin tergantung pada parameter manufaktur dan desain dari turbin itu sendiri. Kondisi isentropik inlet dan outlet pada turbin dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$\dot{W}_{Turb} = \eta_{Turb} \times \dot{m} (h_3 - h_4) \quad (8)$$

dimana :

$\dot{W}_{Turb}$ = Kerja yang dihasilkan turbin (W)

η_{Turb} = Efisiensi isentropik turbin (%)

$\dot{m}$ = Laju aliran fluida (kg/s)

h_3 = Entalpi outlet evaporator (J/kg)

h_4 = Entalpi outlet dari turbin (J/kg)

2.9.7 Kondensor

Seperti halnya pada evaporator, proses yang terjadi pada kondensor terjadi secara isothermal dimana cairan dalam fase uap lanjutan (*superheated*) terkondensasi seiring dengan penurunan temperatur dan tekanan hingga kembali ke fase awal siklus yakni pada fase cair (*subcooled*). Energi panas yang hilang pada proses kondensasi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m} (h_4 - h_1) \quad (9)$$

dimana :

$\dot{Q}_{Cond}$ = Laju perpindahan panas pada kondensor (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran fluida (kg/s)

h_4 = Entalpi outlet turbin

h_1 = Entalpi outlet kondensor

2.9.8 Pompa

Pompa memiliki peran penting dalam sistem yang berfungsi untuk mentransfer fluida kerja dari area bertekanan rendah dalam sistem ke area bertekanan tinggi agar fluida dapat terus bersirkulasi. Seperti halnya pada turbin, proses yang terjadi pada pompa merupakan ekspansi isentropik. Adapun efisiensi pompa biasanya ditentukan oleh desain dan parameter manufaktur. Energi yang dikonsumsi pompa untuk sirkulasi fluida dituliskan dengan persamaan berikut.

$$\dot{W}_{Pump} = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (10)$$

dimana :

$\dot{W}_{Pump}$ = Kerja yang dilakukan Pompa (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran fluida (kg/s)

h_1 = Entalpi outlet kondensor

h_2 = Entalpi outlet pompa

2.9.9 Daya Output Siklus

Berdasarkan hukum pertama termodinamika, daya output dari sistem disimpulkan berdasarkan energi yang di ekstraksi fluida di evaporator dengan daya bersih yang dihasilkan turbine, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{W}_{Net} = \dot{W}_{Turb} - \dot{W}_{Pump} \quad (11)$$

dimana :

$\dot{W}_{Net}$ = Daya output (W)

$\dot{W}_{Turb}$ = Kerja yang dihasilkan turbin

$\dot{W}_{Pump}$ = Daya yang terpakai di pompa

2.9.10 Efisiensi Termal

Nilai efisiensi termal menunjukkan seberapa efektif siklus dalam konversi energi panas menjadi energi gerak pada turbin. Efisiensi termal didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja bersih yang dihasilkan turbin dan panas yang

diekstraksi fluida kerja pada evaporator. Secara matematis, dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_{Evap}} \times 100 \quad (12)$$

dimana :

η_{net} = Efisiensi total siklus (%).

$\dot{W}_{Net}$ = Daya output (W)

$\dot{Q}_{Evap}$ = Laju perpindahan panas pada evaporator (W)

2.9.11 Laju Aliran Massa

Dalam siklus rankine organik, laju aliran massa mengacu pada jumlah massa fluida yang mengalir dalam sistem per satuan waktu, dengan mengetahui entalpi uap fluida dan beban panas yang dapat diserap evaporator maka laju aliran dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{Load}}{h_3 - h_2} \quad (13)$$

dimana :

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

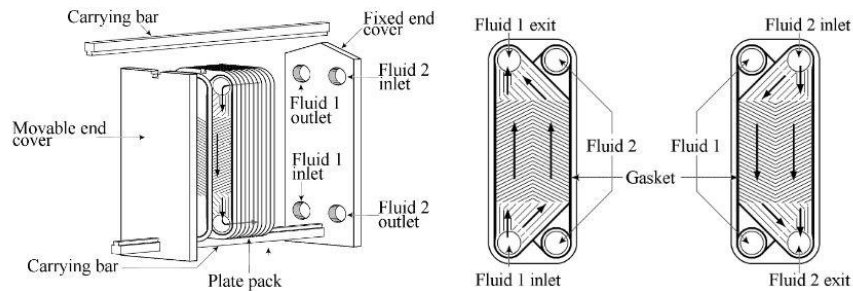
$\dot{Q}_{Load}$ = Kapasitas panas (W)

h_3 = Entalpi outlet evaporator (J/kg)

h_2 = Entalpi outlet pompa (J/kg). (Tarrad, 2022).

2.10 Penukar Panas Tipe Pelat Rangka

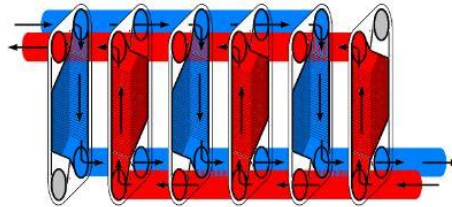
Penukar panas tipe rangka plat rangka (*Gasket plate heat exchanger*) adalah alat yang umum digunakan dalam berbagai industri untuk mentransfer panas antara dua fluida. Konstruksi dasar penukar panas terdiri dari sejumlah plat logam persegi panjang tipis yang memiliki gasket atau segel disepanjang tepinya yang disatukan dalam satu rangka (Shah & Sekulic, 2003). Struktur desain dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur penukar panas tipe plat rangka
Sumber : Saari, *Heat Exchanger Dimensioning*, (2010)

Material plat biasanya biasanya terbuat dari logam konduktif tinggi tahan karat seperti aluminium, kuningan, atau baja tahan karat lainnya. Masing-masing plat memiliki 4 lubang yang berfungsi sebagai saluran masuk dan keluar, dan segel di setiap tepi plat yang berfungsi mengarahkan fluida dalam aliran bergantian (Kuppan, 2013).

Susunan aliran dalam penukar panas pelat rangka biasanya dalam aliran berlawanan dengan lintasan tunggal atau ganda per fluida (Saari, 2010). Susunan aliran fluida dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Susunan aliran fluida (*counter flow*) plate heat exchanger
Sumber : Saari, *Heat Exchanger Dimensioning*, (2010)

2.11 Refrigeran R245fa



Gambar 11. Refrigeran *r245fa*

Pentafluoropropane, disebut *HFC-245FA*, atau refrigeran gas *R245fa*, atau *foaming agent R245fa* adalah cairan tidak berwarna, transparan dan mudah mengalir, dengan titik didih 15,3 °C, stabil pada suhu dan tekanan kamar.

R245fa umumnya digunakan sebagai foaming agent untuk lemari es, pelat bahan insulasi polyurethane. Ini juga merupakan zat pendingin dan banyak digunakan dalam sistem siklus Rankine organik (*ORC*), banyak digunakan dalam panas limbah suhu rendah (limbah gas buang dan gas industri), energi surya, energi biomassa, *OTEC*, dan, industri energi panas bumi.

Tabel 2. Properti cairan *r245fa*

Properti	Nilai
Rumus Kimia	<i>C3H3F5</i>
Berat Molekul	134,05 g/mol
Titik Didih	15,3 °C
Suhu Kritis	154,01 °C
Tekanan Kritis	3,651 Mpa
Densitas Kritis	526 kg/m ³
Densitas Uap (pada titik didih)	6,11 kg/m ³
Densitas Cair (pada 25°C)	1317 kg/m ³
Panas Penguapan	173,2 kJ/kg
ODP	0,00
GWP	1030
Keamanan	A1 (toksisitas rendah, tidak mudah terbakar)

Sumber : *A fundamental equation of state for 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (r-245fa)* (2015)

2.12 Refprop

Refprop adalah program perangkat lunak yang digunakan untuk menghitung sifat termofisika zat dan campuran zat. Nama *Refprop* adalah singkatan dari "*Reference Fluid Thermodynamics and Transport Properties*" yang berarti "Referensi Termodinamika Fluida dan Properti Transportasi". Perangkat lunak ini dikembangkan oleh *National Institute of Standards and Technology* (NIST) di Amerika Serikat dan digunakan secara luas di berbagai industri, termasuk industri kimia, energi, dan mekanik. *Refprop* didasarkan pada model cairan murni dan campuran yang paling akurat yang tersedia saat ini. *Refprop* memiliki basis data yang komprehensif tentang sifat termofisika dari berbagai fluida, seperti sifat termodinamika (seperti entalpi, entropi, dan energi internal), sifat transpor (seperti viskositas, konduktivitas termal, dan difusivitas), serta data terkait lainnya. Hal ini berguna dalam desain dan analisis proses yang melibatkan berbagai jenis fluida, mulai dari gas alam hingga bahan kimia yang kompleks (NIST, 2019).

2.13 Matlab R2022a

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah bahasa pemrograman dan lingkungan komputasi numerik yang dikembangkan oleh *MathWorks*. *Matlab* digunakan secara luas dalam bidang teknik, sains, dan ekonomi untuk berbagai keperluan, termasuk analisis data, pemodelan, simulasi, dan pengembangan algoritma. Dalam analisis termodinamika, *Matlab* digunakan dengan *Refprop* untuk mengakses properti termodinamika dan analisis perpindahan panas. Contohnya, properti seperti tekanan, suhu, entalpi, dan viskositas dapat diakses menggunakan fungsi-fungsi *Refprop* dalam *Matlab*. Dengan kombinasi ini, pengguna dapat melakukan analisis termodinamika yang mendalam untuk sistem energi, seperti pemodelan siklus termodinamika dan analisis sistem pendingin atau pemanas.

2.14 Simulink

Simulink adalah sebuah lingkungan pengembangan grafis yang merupakan bagian dari paket perangkat lunak *Matlab*. *Simulink* digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamis yang melibatkan berbagai blok fungsional yang saling terhubung (Natick, 2022).