



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM TERMODINAMIKA SIKLUS RANKINE ORGANIK
DENGAN FLUIDA KERJA R-22**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

READYAS WIBAWA

0906605076

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

SISTEM TERMODINAMIKA SIKLUS RANKINE ORGANIK DENGAN FLUIDA KERJA R-22

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tugas akhir yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Readyas Wibawa

NPM : 0906605076

Tanda Tangan : 

Tanggal : 29 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Readyas Wibawa
NPM : 0906605076
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Sistem Termodinamika Siklus Rankine Organik Dengan Fluida Kerja R-22

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen teknik Mesin Fakultas teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing	: Dr.Ir. M.Idrus Alhamid	(.....)
Penguji	: Dr.-Ing.Ir. Nasruddin. M.Eng	(.....)
Penguji	: Dr. Ir. Budihardjo, Dipl.Ing	(.....)
Penguji	: Dr. Agus Pamitran, ST.,Meng	(.....)

Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok
Tanggal : Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena karunia rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tugas Akhir ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

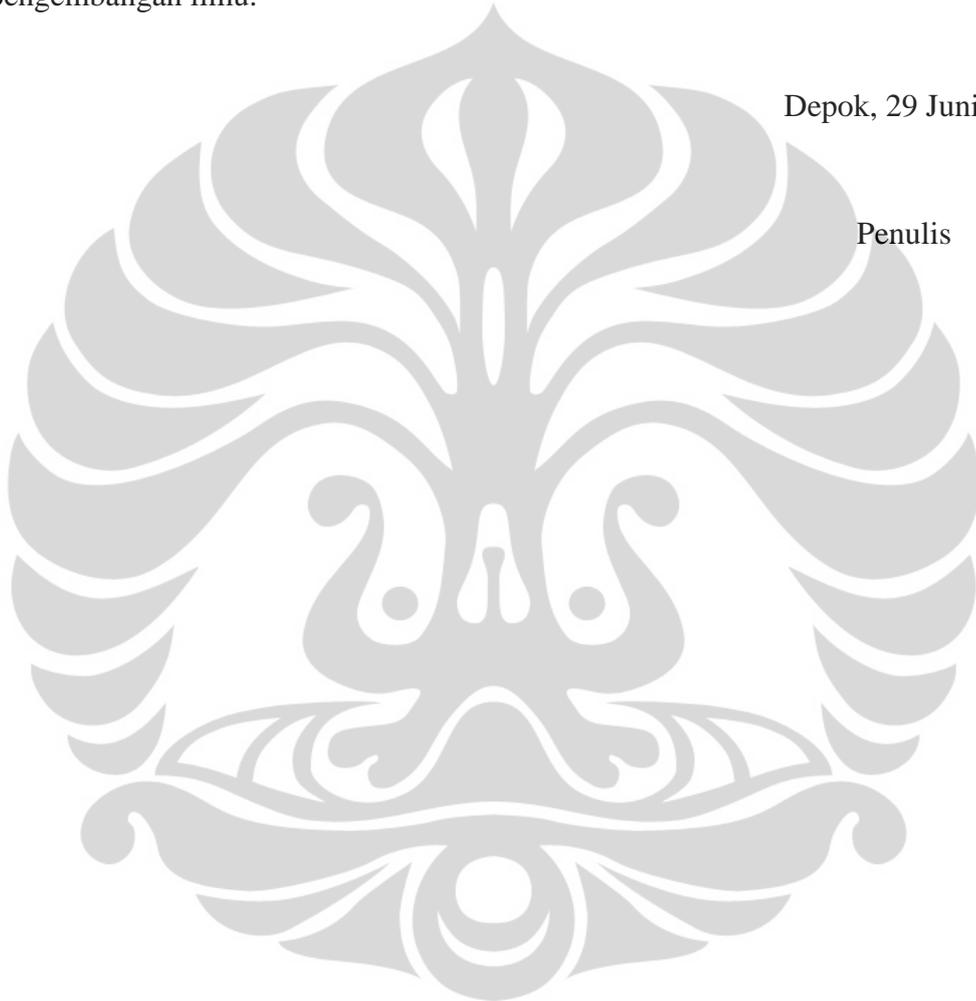
1. Kedua orang tua saya yang selalu mendukung dan mendoakan yang terbaik untuk putranya.
2. Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing tugas akhir dan pembimbing akademis yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil.
3. Seluruh dosen dan staff Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang bermanfaat kepada saya selama kuliah di Teknik Mesin Universitas Indonesia.
4. Pak. Rully dan Arnas sebagai orang yang berpengalaman yang selalu memberikan ide dan bimbingan dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Regie Poulanka dari tim ORC sebagai rekan kerja dan teman yang kompak dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Bpk. Benedictus sebagai ahli *turbocharger* yang telah menyumbangkan sebuah turbocharger terhadap team ORC.
7. Angga Pramukti, Iwan dari tim solar collector tanpa bantuan mereka pengujian temperatur yang diinginkan tidak akan tercapai.
8. Dwi Ayu Firdausi sebagai pendamping yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun material.
9. Teman-teman Mesin Ekstensi angkatan 2009 yang selalu memberikan semangat serta masukan kepada penulis dan juga sedang berjuang dengan tugas akhirnya.

10. Teman-teman Laboratorium Refrijerasi Teknik Mesin Reguler yang selalu memberikan dukungan dan masukan serta ide yang membantu dalam pembuatan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah S.W.T. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 29 Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Readyas Wibawa
NPM : 0906605076
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**SISTEM TERMODINAMIKA SIKLUS RANKINE ORGANIK DENGAN
FLUIDA KERJA R-22**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 29 Juni 2012

Yang menyatakan



(Readyas Wibawa)

ABSTRAK

Nama : Readyas Wibawa
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Sistem Termodinamika Siklus Rankine Organik Dengan Fluida Kerja R-22

Siklus rankine organik (ORC) merupakan sebuah sistem pembangkit yang berasal dari sumber energi yang telah diperbaharui. Sumber energi tersebut dapat berasal dari panas matahari, energi biomass, dan energi banyak energi yang dapat diperbaharui lainnya. Siklus rankine organik ini berguna untuk mengkonversikan energi panas yang didapat agar menjadi energi mekanis yang kemudian dikonversikan lagi menjadi energi listrik dengan temperatur rendah yang dihasilkan dari sumber energi. Pada sistem siklus rankine organik digunakan 2 buah alat penukar kalor, dimana masing-masing alat tersebut berfungsi sebagai evaporator dan condenser. Fluida kerja yang digunakan yaitu fluida refrigeran tipe R-22 dengan melting point pada $T = -175,42^{\circ}\text{C}$, boiling point pada $T = -40,7^{\circ}\text{C}$ dan tekanan vapor pada $p = 980 \text{ KPa}$ saat $T = 20^{\circ}\text{C}$. Proses kerja siklus rankine organik dilakukan dengan temperatur dan tekanan tertentu untuk mencapai kondisi yang diinginkan. Hal ini berfungsi agar mengetahui performa putaran turbin yang diaplikasikan dengan turbocharger untuk memutar generator listrik dengan daya 50 KW.

Kata Kunci : siklus rankine organik, konversi energi, alat penukar kalor, fluida kerja, putaran.

ABSTRACT

Name : Readyas Wibawa
Study Program : Mechanical Engineering
Title : *Organic Rankine Cycle System Thermodynamic Using R-22
As The Working Fluid*

Organic Rankine Cycle (ORC) is a system of generating energy from sources that have been refurbished. The energy source can be derived from solar heat, biomass energy, and many energy other renewable energy. The organic Rankine cycle is useful for converting heat energy into mechanical energy in order to obtain a longer and then converted into electrical energy with low temperatures resulting from the energy source. In the organic Rankine cycle system used two pieces of equipment heat exchanger, where each device functions as an evaporator and condenser. The working fluid used is the type of fluid refrijeran R-22 with the melting point at $T = -175,42^{\circ}\text{C}$, boiling point at $T = -40,7^{\circ}\text{C}$ and vapor pressure at $p = 980 \text{ KPa}$ at $T = 20^{\circ}\text{C}$. Organic Rankine cycle process work done by the temperature and pressure to achieve the desired condition. This works in order to know the performance of spin applied to the turbocharger turbine to rotate the electric generator with a 50 KW power.

Key word : *organic rankine cycle, energy conversion, heat exchager, the working fluid, rotation.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metode Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Dasar Termodinamika.....	5
2.1.1 Siklus Termodinamika.....	5
2.1.2 Properti dan Proses	5
2.1.3 Volume Spesifik	6
2.1.4 Tekanan	6
2.1.5 Temperatur.....	8
2.1.6 Fase	8
2.1.7 Sistem	8
2.1.8 Batas Sistem	9
2.1.9 Lingkungan.....	9
2.1.10 Zat Murni	10
2.1.11 Hukum Pertama Termodinamika.....	10
2.2. Perubahan Fase Pada Zat Murni	11
2.2.1 Cair Tekan(<i>compressed Liquid</i>)	11
2.2.2 Cair Jenuh (<i>Saturated Liquid</i>)	12
2.2.3 Campuran Air-Uap (<i>Liquid Vapor Mixture</i>)	12
2.2.4 Uap Jenuh (<i>Saturated Vapor</i>)	13
2.2.5 Uap Panas Lanjut (<i>Superheated Vapor</i>)	14
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	15
2.4 Siklus Rankine Ideal	15
2.5 Analisis Energi Pada Sistem Pembangkit Listrik	17
2.6 Sistem Pendingin.....	20

BAB 3 METODE PENELITIAN.....	22
3.1 Skema Siklus Rankine Organik	22
3.1.1 Pompa	22
3.1.2 Booster Pump	23
3.1.3 Heat Storage Tank	24
3.1.4 Plate Heat Exchanger	24
3.1.5 Filter Dryer	25
3.1.6 Katup On/Off	25
3.1.7 <i>Refrigerant Accumulator</i>	26
3.1.8 <i>Liquid Reciever</i>	26
3.1.9 <i>Heater</i>	27
3.1.10 Turbin	27
3.1.11 Termokopel	27
3.1.12 <i>Pressure Transmitter</i>	28
3.1.13 Motor Listrik	28
3.1.14 <i>Automatic Voltage Regulator</i>	29
3.1.15 Data Akuisisi (NI-DAQ)	30
3.2 Test Kebocoran	30
3.3 Tahap Simulasi dan Pengambilan Data.....	31
 BAB 4 ANALISA DAN PERCOBAAN ALAT UJI.....	 33
4.1 Proses Analisa Fluida Kerja Sistem ORC.....	32
4.2 Analisa Sistem <i>Organic Rankine Cycle</i> Dengan <i>Cycle Tempo</i>	40
 BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.	 55
5.1. Kesimpulan	55
5.2. Saran.....	55
 DAFTAR PUSTAKA	 56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Skema Siklus Rankine	2
Gambar 2.1. Hubungan antara tekanan absolute, tekanan atmosfer , Tekanan gauge, dan tekanan vakum	7
Gambar 2.2. Sistem Termodinamika	10
Gambar 2.3. Konversi Energi	11
Gambar 2.4. Air pada fase cair tekan	12
Gambar 2.5. Air pada fase cair jenuh	12
Gambar 2.6. Campuran Air dan Uap	13
Gambar 2.7. Uap Jenuh	13
Gambar 2.8. Uap Panas Lanjut	14
Gambar 2.9. Diagram T-V pemanasan air pada tekanan konstan	14
Gambar 2.10. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap	15
Gambar 2.11. Siklus Rankine Sederhana	16
Gambar 2.12. Siklus Rankine ideal dan aktual	19
Gambar 3.1. Skema Alat Uji (siklus rankine organik)	22
Gambar 3.2. Pompa	23
Gambar 3.3. <i>Booster pump</i>	24
Gambar 3.4. <i>Heat Storage Tank</i>	24
Gambar 3.5. <i>Plate Heat exchanger</i>	25
Gambar 3.6. Filter Dryer	25
Gambar 3.7. Katup On/off	26
Gambar 3.8. <i>Refrigeran Accumulator</i>	26
Gambar 3.9. <i>Liquid Receiver</i>	26
Gambar 3.10. <i>Heater</i>	27
Gambar 3.11. Turbin	27
Gambar 3.12. <i>Thermocouple</i>	27
Gambar 3.13. <i>Pressure Transmitter</i>	28
Gambar 3.14. Motor Listrik	29
Gambar 3.15. <i>Automatic Voltage regulator</i>	29
Gambar 3.16. DAQ	30
Gambar 4.1. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 20° C	34
Gambar 4.2. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 23° C	35
Gambar 4.3. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 25° C	35
Gambar 4.4. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 30° C	36
Gambar 4.5. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 35° C	37
Gambar 4.6. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 40° C	37
Gambar 4.7. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 45° C	38
Gambar 4.8. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 50° C	39
Gambar 4.9. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 60° C	39
Gambar 4.10. Karakteristik fluida kerja R-22 T = 80° C	40
Gambar 4.11. Simulasi <i>cycle tempo</i> saat P _{in} = 13,6 Bar dan T = 46° C	41
Gambar 4.12. Simulasi <i>cycle tempo</i> saat P _{in} = 13 Bar dan T = 55° C	42
Gambar 4.13. Simulasi <i>cycle tempo</i> saat P _{in} = 13,6 Bar dan T = 55° C	43
Gambar 4.14. Simulasi <i>cycle tempo</i> saat P _{in} = 13,6 Bar dan T = 50° C	44
Gambar 4.15. Simulasi <i>cycle tempo</i> saat P _{in} = 13,6 Bar dan T = 60° C	45

Gambar 4.16.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 70^{\circ}C$	46
Gambar 4.17.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$	47
Gambar 4.18.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$	48
Gambar 4.19.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 50^{\circ}C$	49
Gambar 4.20.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$	50
Gambar 4.21.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$	51
Gambar 4.22.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$	52
Gambar 4.23.	Simulasi <i>cycle tempo</i> saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$	53



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Properti Refrigeran R-22.....	21
Tabel 4.1	Hasil Percobaan Alat Uji Pertama	32
Tabel 4.1	Hasil Percobaan Alat Uji Kedua	33
Tabel 4.1	Hasil Simulasi <i>Cycle Tempo</i>	54



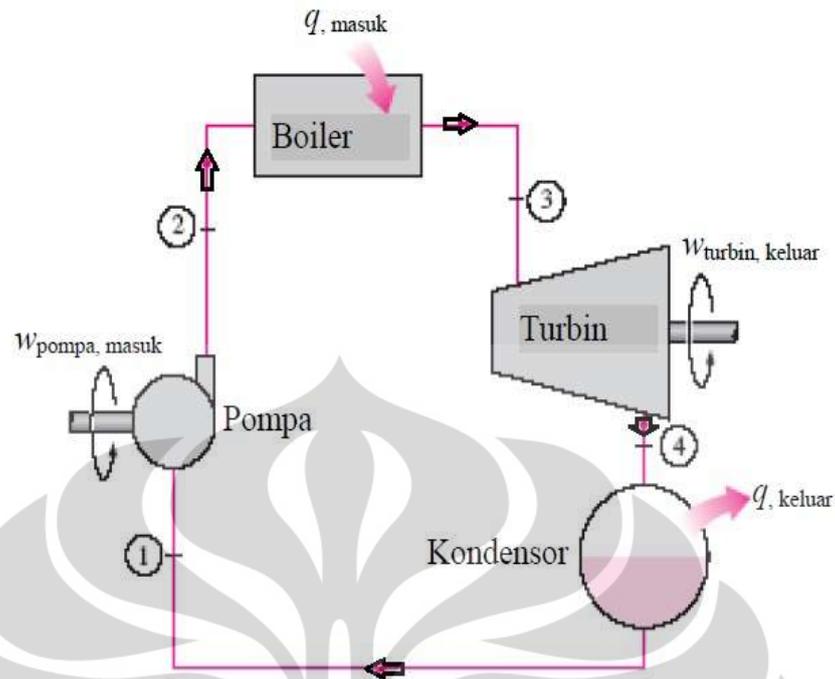
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan manusia membutuhkan energi dalam melakukan aktivitas sehari-harinya. Kebutuhan energi tersebut semakin meningkat sesuai dengan cepatnya pertumbuhan manusia. Maka dari itu semakin meningkatnya kebutuhan energi untuk melakukan aktivitas, semakin meningkat pula energi yang digunakan oleh makhluk hidup. Hal ini mengakibatkan ketersediaan energi di bumi ini semakin menipis. Permasalahan itu sendiri timbul karena perilaku manusia sebagai makhluk hidup yang sangat memiliki rasa ketergantungan pada satu atau beberapa sumber energi, seperti halnya minyak bumi dan batu bara. Pada umumnya sumber energi dibagi menjadi dua, yaitu energi yang dapat diperbaharui dan energi yang tidak dapat diperbaharui.

Dalam beberapa tahun terakhir banyak dilakukan sebuah penelitian yang intensif terhadap perangkat siklus rankine organik. Hal ini terjadi karena semakin banyaknya kebutuhan akan sebuah teknologi utama untuk mengkonversikan sumber energi panas dengan temperatur rendah kedalam sebuah sistem tertentu. Sumber energi panas tersebut bisa didapatkan dari berbagai banyak proses thermal seperti halnya batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir, panas matahari, energi panas bumi, dan masih banyak lagi sumber energi lain yang mungkin masih sedang dalam masa penelitian. Hal ini adalah termasuk sebuah pemanfaatan energi yang dapat diperbaharui. Teknologi organic rankine cycle (ORC) atau disebut siklus rankine organik memiliki cara kerja yang mirip dengan sebuah sistem siklus konversi energi uap konvensional. Namun, siklus rankine organik memiliki perbedaan didalam penggunaan fluida kerjanya yaitu refrigeran hidrokarbon.



Gambar 1.1 Skema siklus rankine

Organic rankine cycle (ORC) merupakan sebuah siklus termodinamika yang termasuk kedalam metode pemanfaatan energi yang dapat diperbaharui, yaitu dengan memanfaatkan sebuah energi panas surya menjadi energi kerja. Dimana sebuah energi panas tersebut disuplai secara external pada aliran yang tertutup dengan menggunakan fluida yang bergerak. Dalam berbagai sistem pembangkitan daya, banyak perhatian yang ditujukan kepada sebuah pengkonversian energi dalam dari molekul-molekul bahan bakar hidrokarbon, atau energi atomik dari uranium untuk menjadi energi listrik atau mekanis. Siklus ini pun telah menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik diseluruh didunia

1.2 Perumusan Masalah

Dalam studi ini akan dilakukan analisa performasi dari alat uji dengan menggunakan fluida kerja refrijeran R-22, untuk mengetahui karakteristik dari *organic rankine cycle* (ORC). Sistem ini menggunakan *plate heat exchanger* sebagai alat penukar kalor, tanki *boiler* sebagai wadah sumber kalor yang dilengkapi dengan *heater*, *turbocharger* sebagai turbin, dan pompa berfungsi untuk menaikkan tekanan dan menjalankan sirkulasi sistem.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui fungsi dan prinsip kerja komponen-komponen pada sistem *organik rankine cycle* (ORC).
2. Untuk mengetahui kondisi aktual dari sistem *organic rankine cycle* (ORC) sehingga dapat dibuat siklus rankine organik aktualnya.
3. Untuk mendapatkan karakteristik sistem *organic rankine cycle* (ORC) pada *setting point temperature boiler* dengan range temperatur 65° - 90° C.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, akan dilakukan sebuah analisa karakteristik *organic rankine cycle* (ORC) pada *setting point temperature boiler* yang ditentukan sebesar 65-90°C dengan penggunaan fluida kerja refrijeran R-22 dalam simulasi *cycle tempo*.

1.5 Metode Penelitian

Analisa dilakukan dengan studi literatur, membeli dan melengkapi semua komponen sistem, membuat sistem ORC, melakukan kalibrasi alat uji, pengecekan sistem, pengujian sistem dan analisa dengan simulasi *cycle tempo* dan kesimpulan hasil pengujian simulasi *cycle tempo*.

Dalam perumusan skripsi ini dikerjakan bersama rekan satu team Regie Poulanka Tresna, sehingga terdapat beberapa kemiripan dalam penulisannya.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah penulis dan para pembaca maka penulisan tugas ini menggunakan sistematika sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini penulis menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan studi, batasan masalah, metodologi studi, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini penulis menjelaskan tentang dasar-dasar teoritis atau konsep-konsep yang digunakan sebagai dasar pemikiran untuk menjelaskan tentang masalah yang akan dibahas. Seperti dasar termodinamika, analisis energi dan siklus rankine pada ORC.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini penulis menjelaskan tentang alur penelitian dan prosedur penelitian yang terdiri dari prosedur pengoperasian dan bagian-bagian dari alat penguji yang digunakan dalam penelitian. Selain itu dijelaskan juga mengenai skematik alat uji dan kondisi pengujian yang akan dilakukan.

BAB IV ANALISA DAN PERCOBAAN ALAT UJI

Dalam bab ini penulis menjelaskan tentang pengumpulan dan pengolahan data hasil dari simulasi cycle tempo untuk selanjutnya dianalisa. Analisa yang dilakukan yaitu analisa energi pada sistem siklus rankine organik (ORC).

BAB V PENUTUP

Dalam bab ini penulis menjelaskan tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian dari penulisan tugas akhir yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar termodinamika

2.1.1. Siklus termodinamika

Siklus termodinamika merupakan suatu urutan proses yang berawal dan berakhir pada keadaan yang sama. Pada akhir siklus, semua sifat akan memiliki nilai yang sama dengan kondisi awal. Dengan demikian maka dalam suatu siklus sistem tidak akan mengalami perubahan *netto*. Contohnya uap yang bersirkulasi dalam suatu sistem pembangkit tenaga listrik membentuk sebuah siklus.

Pada suatu keadaan tertentu, setiap sifat memiliki nilai tertentu yang dapat ditentukan tanpa perlu mengetahui bagaimana sistem dapat mencapai keadaan tersebut. Dengan demikian perubahan nilai suatu sifat pada sistem akan berpindah dari suatu keadaan ke keadaan lain sangat ditentukan oleh keadaan awal dan akhir serta tidak dipengaruhi oleh langkah perubahan yang terjadi. Perubahan tidak dipengaruhi oleh sejarah dan rincian proses. Sebaliknya apabila nilai suatu besaran tidak dipengaruhi oleh proses antara dua keadaan, maka besaran tersebut merupakan perubahan sifat.

2.1.2. Properti dan Proses

Properti dari suatu bahan adalah jumlah kuantitatif yang dapat diukur atau dihitung untuk mengetahui kondisi keadaan tertentu pada bahan. Properti ini misalnya massa, tekanan, temperatur, volume, entalpi, dan entropi.

Proses adalah sebuah hal perlakuan yang terjadi untuk mengubah properti. Pada termodinamika proses biasanya melibatkan transfer energi seperti : pemanasan, pendinginan, penekanan (kompresi), pengembangan (ekspansi), pengadukan, atau pemompaan.

Proses-proses yang mungkin digunakan untuk merubah properti adalah : tekanan konstan (isobar), volume konstan (isovolum),

temperatur konstan (isotermal), *adiabatic* (tidak ada aliran panas), *isentalpi* (entalpi tetap), dan *isentropi* (entropi tetap). Proses termodinamika biasanya digambarkan dalam sistem koordinat dua properti, yaitu P-V diagram, P-v diagram, atau T-S diagram. Proses yang berjalan pada satu jenis properti tetap, disebut proses iso - diikuti nama properti-nya, misalnya proses isobar (tekanan konstan), proses isovolum (volume konstan), proses isotermal (temperatur konstan) dan lain-lain.

Suatu sistem disebut menjalani suatu siklus, apabila sistem tersebut menjalani rangkaian beberapa proses, dengan keadaan akhir sistem kembali ke keadaan awalnya.

2.1.3. Volume spesifik

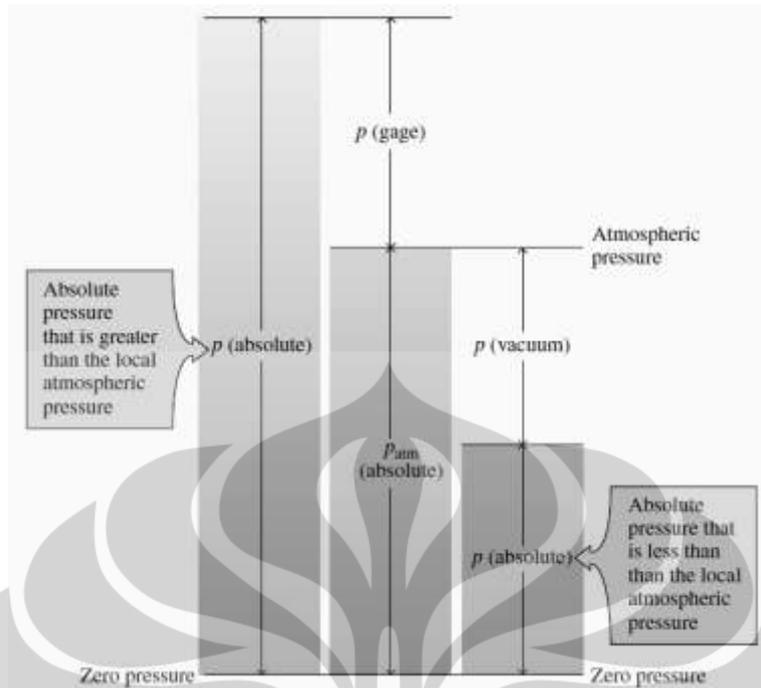
Volume spesifik (v) adalah jumlah volume dalam satu kilogram massa suatu zat (m^3/kg) dan merupakan kebalikan dari densitas $\rho = 1/v$ dengan satuan SI yaitu kg/m^3 .

2.1.4. Tekanan

Tekanan adalah gaya normal (F) tegak lurus yang diberikan oleh suatu fluida persatuan luas benda (A) yang terkena gaya tersebut.

$$p = F/A \dots \dots \dots (2.1)$$

Tekanan sebenarnya atau aktual pada suatu posisi tertentu disebut dengan tekanan absolut sedangkan tekanan yang dibaca oleh suatu alat ukur disebut dengan tekanan gage atau tekanan vakum. Hubungan antara tekanan absolut, tekanan atmosfer, tekanan gauge, dan tekanan vakum ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Hubungan antara tekanan absolut, tekanan atmosfer, tekanan gauge, dan tekanan vakum.

(Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006)

Dalam termodinamika, tekanan p umumnya dinyatakan dalam harga absolut (tekanan absolut/mutlak), maka dalam diktat ini simbol p menyatakan tekanan absolut dari sistem/zat. Tekanan absolut tergantung pada tekanan pengukuran sistem, jadi:

1. Bila tekanan pengukuran (*pressure gauge*) sistem diatas tekanan atmosfer, maka :

Tek absolut = Tek pengukuran + Tek Atmosfir

$$p_{\text{absolut}} = p_{\text{gauge}} + p_{\text{atm}} \dots \dots \dots (2.2)$$

2. Bila tekanan pengukuran (*pressure gauge*) sistem di bawah tekanan atmosfer maka :

Tek absolut = Tek atmosfer – Tek pengukuran

$$p_{\text{absolut}} = p_{\text{atmosfer}} - p_{\text{vakum}} \dots \dots \dots (2.3)$$

2.1.5. Temperatur

Temperatur adalah ukuran panas-dinginnya dari suatu zat. Panas-dinginnya suatu zat berkaitan dengan energi termal yang terkandung dalam zat tersebut. Makin besar energi termalnya, makin besar temperaturnya. Sehingga, temperatur dari suatu benda menyatakan keadaan termal benda tersebut dan kemampuan benda untuk bertukar energi dengan benda lain yang bersentuhan dengan benda tersebut. Benda yang bersuhu tinggi akan memberikan energinya kepada benda yang bersuhu rendah. Satuan untuk temperatur adalah Celcius (C) dan dapat diukur dengan menggunakan termometer. Temperatur absolut (T) adalah derajat diatas temperatur nol absolut yang dinyatakan dengan satuan Kelvin (K).

$$T = t^{\circ}C + 273 \dots \dots \dots (2.4)$$

Konversi satuan pada temperatur

$$\begin{aligned} {}^{\circ}F &= 32 + (9/5 \cdot {}^{\circ}C) \\ {}^{\circ}R &= 9/5 \cdot {}^{\circ}K \dots \dots \dots (2.5) \end{aligned}$$

2.1.6. Fase

Fase (*phase*) menggambarkan sejumlah materi yang homogen dalam komposisi kimia maupun struktur fisiknya. Homogenitas dalam struktur fisik berarti bahwa materi tersebut seluruhnya berada dalam kondisi padat, cair, uap atau gas.

2.1.7. Sistem

Sistem adalah suatu massa atau daerah yang dipilih, untuk dijadikan obyek analisis. Atau sistem adalah segala sesuatu yang ingin dipelajari. Sistem Termodinamika ada tiga macam, yaitu :

1. Sistem tertutup

Dalam sistem tertutup massa dari sistem yang dianalisis tetap dan tidak ada massa keluar dari sistem atau masuk kedalam sistem, tetapi volumenya bisa berubah. Yang dapat keluar masuk sistem

tertutup adalah energi dalam bentuk panas atau kerja. Atau dengan kata lain sistem tertutup berisi materi yang sama, dimana perpindahan massa melalui batas sistem tidak dimungkinkan.

Contoh sistem tertutup adalah suatu balon udara yang dipanaskan, dimana massa udara didalam balon tetap, tetapi volumenya berubah, dan energi panas masuk kedalam massa udara didalam balon.

2. Sistem terbuka

Dalam sistem terbuka, energi dan masa dapat keluar sistem atau masuk kedalam sistem melewati batas sistem. Sebagian besar mesin-mesin konversi energi adalah sistem terbuka.

Sistem mesin motor bakar adalah ruang didalam silinder mesin, dimana campuran bahan bahan bakar dan udara masuk kedalam silinder, dan gas buang keluar sistem melalui knalpot. Turbin gas, turbin uap, pesawat jet dan lain-lain adalah merupakan sistem termodinamika terbuka, karena secara simultan ada energi dan massa keluar-masuk sistem tersebut.

3. Sistem terisolasi

Tidak ada pertukaran massa dan energi sistem dengan lingkungan. Atau dengan kata lain sistem tidak terpengaruh sama sekali oleh lingkungan. Misalnya: Tabung gas yang terisolasi.

2.1.8. Batas Sistem

Batas sistem adalah batas antara sistem dengan lingkungannya. Dalam aplikasinya batas sistem merupakan bagian dari sistem maupun lingkungannya, dan dapat tetap atau dapat berubah posisi atau bergerak.

2.1.9. Lingkungan

Lingkungan adalah segala sesuatu yang berada di luar sistem.



Gambar 2.2. Sistem termodinamika

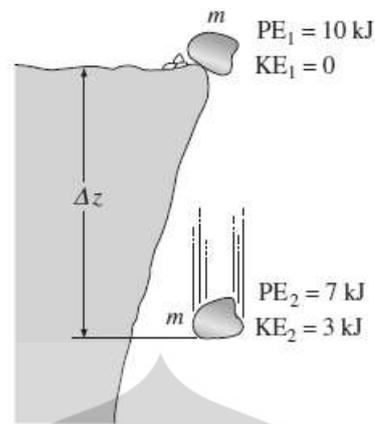
2.1.10. Zat murni

Zat murni (*pure substance*) adalah sesuatu yang memiliki komposisi kimia yang sama dan tetap. Zat murni dapat muncul dalam keadaan satu fase atau lebih, namun komposisi kimianya harus sama dan tetap dalam setiap fasenya. Contohnya jika cairan air dan uap air membentuk sistem berfase dua maka sistem tersebut dapat dianggap sebagai zat murni karena setiap fase memiliki komposisi kimia yang sama.

2.1.11. Hukum pertama termodinamika

Hukum pertama termodinamika dikenal dengan prinsip konservasi energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi hanya dapat diubah dari bentuk satu ke bentuk yang lainnya.

Dari gambar 2.3 kita dapat melihat bentuk perubahan dari energi dimana energi potensial sebagian akan berubah menjadi energi kinetik. Pada saat sebuah batu dengan massa m akan dijatuhkan dari suatu tebing, benda tersebut memiliki energi potensial sebesar 10 kJ dan sesaat setelah dijatuhkan hingga mencapai jarak Δz dari posisi semula maka energi potensialnya berubah menjadi 7 kJ dan sisa energinya yaitu sebesar 3 kJ berubah menjadi energi kinetik.



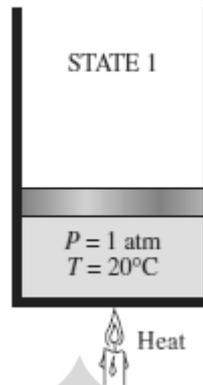
Gambar 2.3 Konservasi energi
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.2. Perubahan fase pada zat murni

Air dapat berada pada keadaan campuran antara cair dan uap, contohnya yaitu pada boiler dan kondenser dari suatu sistem pembangkit listrik tenaga uap. Dibawah ini akan dijelaskan secara lebih rinci mengenai perubahan fase pada zat murni, contohnya air.

2.2.1 Cair tekan (*Compressed liquid*)

Fluida berisi air pada 20°C dan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini, air berada pada fase cair tekan karena temperatur dari air tersebut masih dibawah temperatur saturasi air pada saat tekanan 1 atm. Kemudian kalor mulai ditambahkan kedalam air sehingga terjadi kenaikan temperatur. Seiring dengan kenaikan temperatur tersebut maka air secara perlahan berekspansi dan volume spesifiknya meningkat. Karena ekspansi ini maka piston juga secara perlahan mulai bergerak naik. Tekanan didalam silinder konstan selama proses karena didasarkan pada tekanan atmosfer dari luar dan berat dari torak.

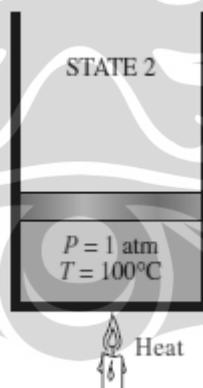


Gambar 2.4. Air pada fase cair tekan (*compressed liquid*)

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.2.2 Cair jenuh (*Saturation liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan ke dalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100 °C. Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian dari air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh (*saturation liquid*) seperti digambarkan pada gambar 2.5.



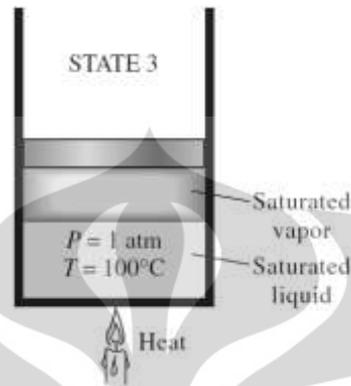
Gambar 2.5. Air pada fase cair jenuh (*saturated liquid*)

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.2.3 Campuran air-uap (*liquid-vapor mixture*)

Saat pendidihan berlangsung, tidak terjadi kenaikan temperatur sampai cairan seluruhnya berubah menjadi uap. Temperatur akan tetap

konstan selama proses perubahan fase jika temperatur juga dijaga konstan. Pada proses ini volume fluida didalam silinder meningkat karena perubahan fase yang terjadi, volume spesifik uap lebih besar daripada cairan. Sehingga menyebabkan torak terdorong keatas.

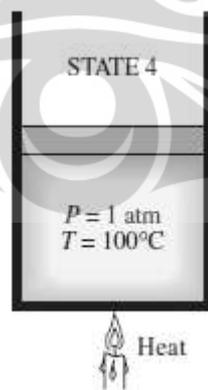


Gambar 2.6. Campuran air dan uap

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.2.4 Uap jenuh (*Saturated vapor*)

Jika kalor terus ditambahkan, maka proses penguapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi.

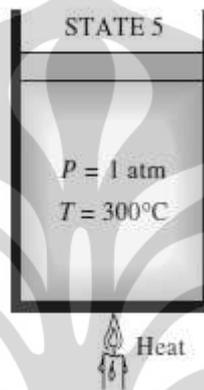


Gambar 2.7. Uap jenuh (*saturated vapor*)

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.2.5 Uap panas lanjut (*Superheated vapor*)

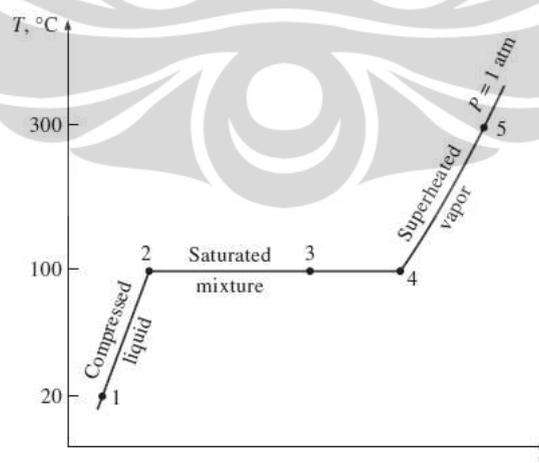
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada gambar 2.8. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap pada tekanan 1 atm yaitu 100 °C.



Gambar 2.8. Uap panas lanjut (*superheated vapor*)

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

Proses diatas digambarkan pada suatu diagram T-v seperti terlihat pada gambar 2.9 dibawah ini.

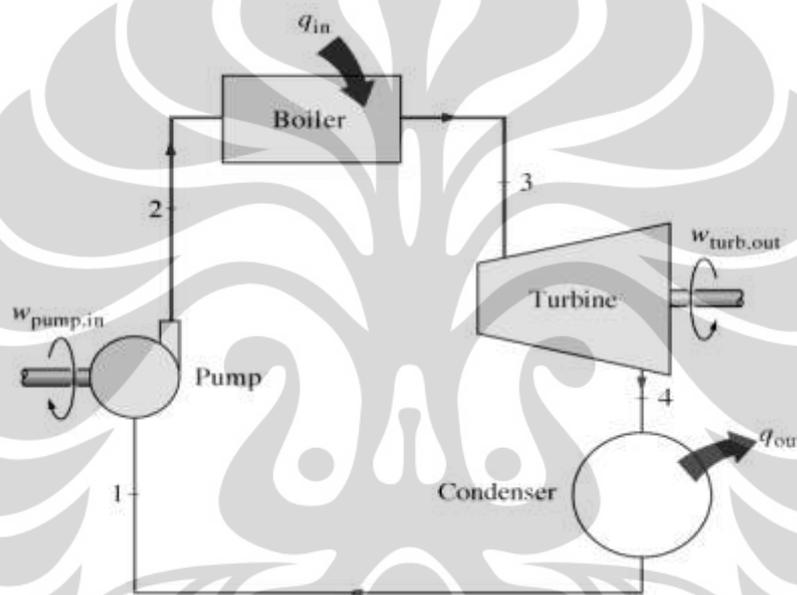


Gambar 2.9. Diagram T-v pemanasan air pada tekanan konstan

(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu dari jenis pembangkit, dimana pembangkit ini memanfaatkan uap yang dihasilkan oleh boiler sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin dan sekaligus memutar generator sehingga akan dihasilkan tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga uap yang sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu boiler, turbin uap, kondenser dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap dapat ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.10. Skema pembangkit listrik tenaga uap
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

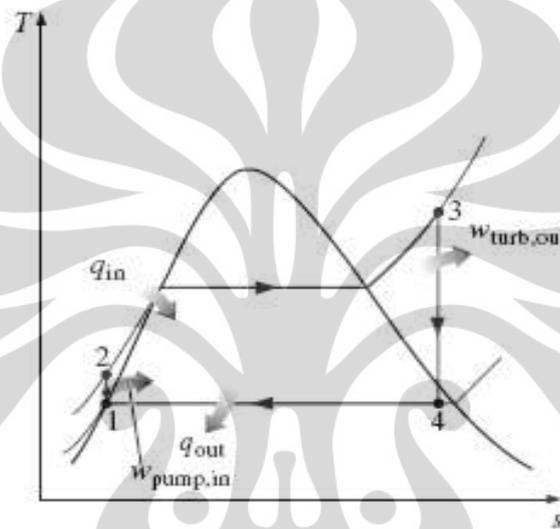
2.4 Siklus Rankine Ideal

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus Rankine. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal.

Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus Carnot dapat dicapai pada daerah uap basah dimana

perubahan entalpi fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperatur. Temperatur hanya diatur oleh tekanan uap fluida.

Kerja pompa pada siklus Rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot. Siklus Rankine ideal dapat digambarkan dalam diagram T-S dan H-S seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.11. Siklus Rankine Sederhana
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses :

- 1 – 2 Kompresi isentropik dengan pompa.
- 2 – 3 Penambahan panas dalam boiler secara isobar
- 3 – 4 Ekspansi isentropik pada turbin.
- 4 – 1 Pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isothermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated*

pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh *boiler* ke air pada tekanan yang tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai *steam generator*. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari steam akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

2.5 Analisis Energi Pada Sistem Pembangkit Listrik

Perpindahan kalor yang tidak dapat dihindari antara komponen pembangkit dan sekelilingnya diabaikan untuk memudahkan analisis. Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak (*steady*). Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama-sama dengan idealisasi tersebut maka akan dikembangkan persamaan untuk perpindahan energi pada masing-masing komponen pembangkit.

1. Pompa

Kondensat cair yang meninggalkan kondenser pada kondisi 1 dipompa dari kondenser kedalam boiler sehingga tekanannya naik. Dengan menggunakan volume atur disekitar pompa dan mengasumsikan tidak ada perpindahan kalor disekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah

$$(q - w) = (h_1 - h_2) + ((v_1^2 - v_2^2) / 2) + g(z_1 - z_2) \dots \dots \dots (2.6)$$

atau

$$w_p = h_2 - h_1 \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana w_p adalah tenaga masuk per unit massa yang melalui pompa.

2. Boiler

Fluida kerja meninggalkan pompa pada kondisi 2 yang disebut air-pengisian, dipanaskan sampai jenuh dan diuapkan di dalam boiler. Dengan menggunakan volume atur yang melingkupi tabung boiler dan drum yang mengalirkan air-pengisian dan kondisi 2 ke kondisi 3, kesetimbangan laju massa dan energi menghasilkan

$$Q_{in} = h_3 - h_2 \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana q_{in} adalah laju perpindahan kalor dari sumber energi ke dalam fluida kerja per unit massa yang melalui boiler.

3. Turbin

Uap dari boiler pada kondisi 3, yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondenser pada kondisi 4 dengan tekanan yang relatif rendah. Dengan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume atur di sekitar turbin pada kondisi lunak menjadi

$$w_t = h_3 - h_4 \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana m menyatakan laju aliran massa dari fluida kerja, dan w_t adalah laju kerja yang dihasilkan per unit massa uap yang melalui turbin.

4. Kondenser

Dalam kondenser terjadi perpindahan kalor dari uap ke air pendingin yang mengalir dalam aliran yang terpisah. Uap terkondensasi dan temperatur air pendingin meningkat. Pada kondisi tunak, kesetimbangan laju massa dan energi untuk volume atur yang melingkupi bagian kondensasi dan penukar kalor adalah

$$q_{out} = h_4 - h_1 \dots\dots\dots(2.10)$$

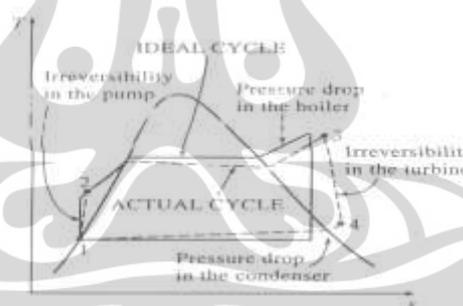
dimana q_{out} merupakan laju perpindahan energi dari fluida kerja ke air pendingin per unit massa fluida kerja yang melalui kondenser.

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja yang masuk kedalam boiler yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto.

$$\eta_{th} = \frac{w_t - w_p}{q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \dots\dots\dots(2.11)$$

Pada kenyataannya terdapat penyimpangan dalam siklus Rankine yang terjadi karena:

1. adanya friksi fluida yang menyebabkan turunnya tekanan di boiler dan condenser sehingga tekanan steam saat keluar boiler sangat rendah sehingga kerja yang dihasilkan turbin (W_{out}) menurun dan efisiensinya menurun. Hal ini dapat diatasi dengan meningkatkan tekanan fluida yang masuk.
2. adanya kalor yang hilang ke lingkungan sehingga kalor yang diperlukan (Q_{in}) dalam proses bertambah sehingga efisiensi termalnya berkurang



Gambar 2.12 siklus rankine ideal dan actual

Penyimpangan ini terjadi karena adanya irreversibilitas yang terjadi pada pompa dan turbin sehingga pompa membutuhkan kerja (W_{in}) yang lebih besar dan turbin menghasilkan kerja (W_{out}) yang lebih. Efisiensi pompa dan turbin yang mengalami irreversibilitas dapat dihitung dengan:

$$\eta_p = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\eta_t = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \dots\dots\dots(2.13)$$

2.6 Sistem Pendingin

Sistem pendingin atau refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu media tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisi tersebut sesuai yang dibutuhkan. Pada sistem refrigerasi membutuhkan kemampuan perpindahan kalor (panas) dari suatu fluida tertentu untuk proses pendinginan. Fluida yang digunakan dalam siklus refrigerasi sebagai penukar kalor disebut refrigeran. Refrigeran berguna untuk menyerap panas (heat) pada temperatur yang rendah. Untuk menurunkan dan menjaga temperatur suatu substansi, sistem refrigerasi harus mampu secara terus menerus menyerap panas dan kemudian membuang atau memindahkan panas tersebut dari sistem. Hal ini dilakukan dengan beberapa langkah berbeda yang disebut siklus refrigerasi.

Siklus pendingin yang sering digunakan yaitu siklus kompresi uap (*vapor-compression refrigeration cycle*). Siklus ini merupakan siklus tertutup dan bekerja secara terus menerus atau continue. Siklus ini menggunakan refrigeran untuk mentransfer panas melalui sistem. Siklus kompresi uap mempunyai 4 proses, yaitu:

1. Penyerapan Panas

Refrigeran dalam bentuk liquid menyerap atau mengambil panas dari sumber panas. Penyerapan panas menyebabkan refrigeran berubah fase dari *liquid* (cair) menjadi *vapor* (uap). Dalam fase uap, refrigeran juga menerima panas dan temperaturnya juga akan meningkat. Jadi pada proses ini refrigeran berubah fase dari cair dengan temperatur rendah menjadi uap dengan temperatur tinggi.

2. Kerja

Refrigeran ditambahkan energi agar dapat melangkah maju menuju proses selanjutnya pada siklus refrigerasi. Langkah ini disebut juga langkah kompresi, refrigeran dalam bentuk uap dikompresi. Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya tekanan dan temperatur refrigeran.

3. Pembuangan Panas

Dengan tekanan dan temperatur yang meningkat kemudian dipindahkan atau dibuang. Pada proses ini refrigeran membuang panas yang telah diserap pada tingkat heat *absorption*. Selama proses ini terjadi refrigeran berubah fase dari uap dengan temperatur tinggi menjadi fase cair dengan temperatur rendah kembali.

4. Ekspansi

Refrigeran dalam fase cair diekspansi yang menyebabkan tekanan menjadi turun. Setelah proses ekspansi, refrigeran dengan fase liquid berada dalam kondisi tekanan dan temperatur rendah, sehingga liquid sekarang dapat memulai siklus kembali.

Dalam sistem siklus rankine organik refrigeran yang kami gunakan adalah fluida kerja dari refrigeran R-22 dengan data properti sebagai berikut :

2.1 Tabel properti refrigeran R-22 dari ASHRAE Fundamental Handbook

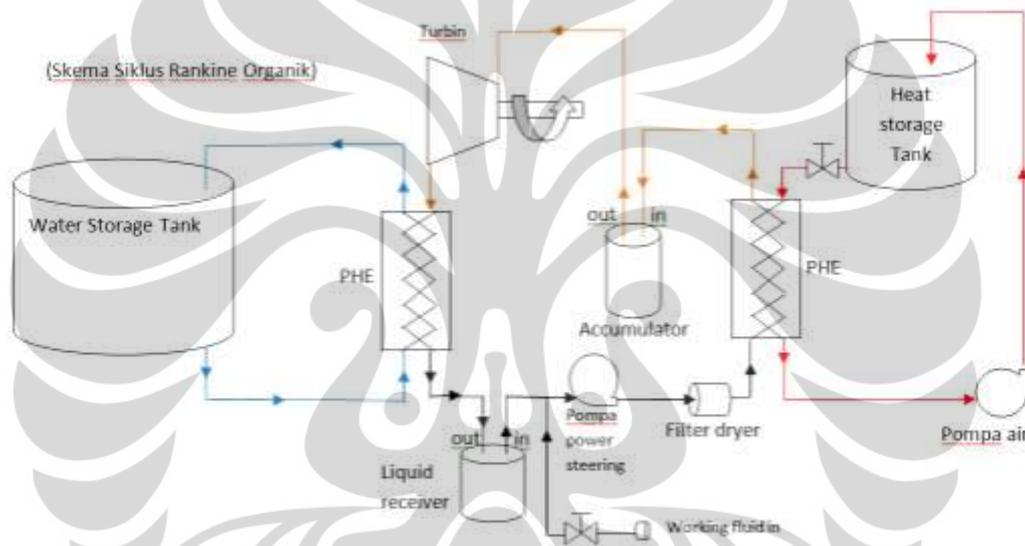
Melting point	-175,42 °C
Boiling point	-40.7 °C
Molar mass	86.47 g/mol
Density	3.66 kg/m ³ at 15°C, gas
Vapor pressure	908 kPa at 20 °C
Specific volume (v) at 21 °C (gas)	0.275 m ³ .kg ⁻¹
Critical temperature (Tc)	96.2 °C (369.3 K)
Latent heat of vaporization (lv)	233.95 kJ.kg ⁻¹
Heat capacity at constant pressure (Cp) at 30°C (86°F)	0.057 kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Heat capacity at constant volume (Cv) at 30°C (86°F)	0.048 kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Ozone depletion potential (ODP)	0.055 (CCl3F = 1)
Global warming potential (GWP)	1810 (CO ₂ = 1)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Skema Siklus Rankine Organik

Pada penelitian sistem siklus rankine organik secara umum dibutuhkan sebuah alat uji sistem siklus rankine organik yang terdiri dari pompa, boiler, turbin, kondenser. Namun, pada alat uji yang digunakan ini dibuat dengan menambah bagian seperti *plate heat exchanger*, *magnet pump*, *refrigerant accumulator*, *refrigerant receiver*, *heater*, *thermostat* dan *booster pump*. Data diperoleh dengan menggunakan data akuisisi (NI Lab View).



Gambar 3.1. Skema Alat Uji (siklus rankine organik)

Berikut adalah komponen – komponen alat uji siklus rankine organik yang digunakan :

3.1.1 Pompa

Pompa memiliki peran yang penting didalam sistem siklus rankine organik. Pompa ini berfungsi untuk meningkatkan tekanan dan temperatur dengan memompakan fluida kerja refrijeran.



Gambar 3.2. Pompa Power Steering

Berikut ini merupakan data dari pompa power steering yang digunakan :

Merek : Mitsubishi colt
 Jenis pompa : sentrifugal
 Fluida Kerja : R-22
 Lubrican : Syntetic

3.1.2 Booster Pump

Booster pump atau biasa disebut dengan kata pompa pendorong ini berfungsi hanya untuk mendorong fluida kerja didalam melakukan sirkulasi untuk sebuah sistem. Berikut ini adalah data yang terdapat pada booster pump:

Merk : Wasser
 Jenis pompa : Axial
 Tegangan/Hz : 220/50
 Daya : 60 W
 Kapasitas : 30 lpm



Gambar 3.3. booster pump

3.1.3 Heat Storage Tank

Heat storage tank memiliki fungsi sebagai penampung air panas dengan temperatur yang ditentukan menggunakan thermostat. Air panas yang didalam heat storage tank melakukan sebuah siste sirkulasi agar terjadi perpindahan kalor pada heat exchanger.



Gambar 3.4. heat storage tank

3.1.4 Plate Heat Exchanger

Plate heat exchanger berfungsi sebagai alat penukar kalor. Pada sistem siklus rankine organik digunakan 2 buah plate heat exchanger, dimana satu buah plate heat exchanger berfungsi sebagai evaporator dan plate heat exchanger yang kedua berfungsi sebagai kondenser.

Berikut ini merupakan data dari plate heat exchanger :

Tipe : plate dan coil

Material : tembaga



Gambar 3.5. plate heat exchanger

3.1.5 Filter Dryer

Filter dryer merupakan suatu alat yang berfungsi untuk menyaring partikel-partikel kecil seperti serpihan logam, plastik, dan debu serta benda asing lain yang dapat membahayakan plate heat exchanger. Selain itu alat ini juga bermanfaat untuk menangkap uap air yang dapat menghambat proses perpindahan kalor di plate heat exchanger, filter dryer ditempatkan setelah pompa magnet.



Gambar 3.6. filter dryer

3.1.6 Katup On/Off

Shut-off valve adalah aksesoris yang digunakan sebagai keran buka tutup aliran refrigeran dan aliran dari air panas dari heat storage tank. Shut-off valve pada sistem ini digunakan untuk memasukkan refrigeran dan air panas.



Gambar 3.7. Katup On/Off

3.1.7 *Refrigeran Accumulator*

Refrigeran *accumulator* memiliki fungsi untuk memisahkan antara fase cair dan gas. Pemakaian refrigeran accumulator berguna untuk memastikan bahwa fluida yang masuk sebelum turbin adalah fase gas.



Gambar 3.8. *refrigeran accumulator*

3.1.8 *Liquid Receiver*

Refrigeran *receiver* memiliki fungsi sebagai pemisah antara fase gas dan cair setelah proses kondensasi pada heat exchanger. Refrigeran receiver berguna untuk memastikan bahwa fluida kerja sebelum pompa magnet adalah fase cair.



Gambar 3.9. Liquid receiver

3.1.9 Heater

Heater berfungsi untuk memanaskan air dengan temperature tertentu menggunakan thermostat. Pada sistem siklus rankine organik, heater memiliki peran yang cukup penting sebagai sumber panas yang didapat.



Gambar 3.10. heater

3.1.10 Turbin

Pada sistem siklus rankine organik, peran turbin sangat penting. Turbin berfungsi untuk memutarakan generator agar dapat menghasilkan energi listrik. Pada alat uji yang digunakan, fungsi kerja turbin diaplikasikan dengan menggunakan screwdriver yang fungsinya agar kita mengetahui kecepatan poros yang didapat sehingga dapat menggerakkan poros generator.



Gambar 3.11. Turbin *turbocharger*

3.1.11 Termokopel

Thermocouple berfungsi untuk mengukur temperatur. Pada sistem ini kami menggunakan 4 titik pengukuran temperatur.



Gambar 3.12. *thermocouple*

Tipe : Tipe K
 Bahan : Cromnel Alumnel
 Ranges Temperatur : -269 °C sampai dengan +1260 °C

3.1.12 *Pressure Transmitter*

Pressure transmitter berfungsi untuk mengukur tekanan dan dapat langsung terbaca hasil pengukurannya melalui data akuisisi yang disambungkan ke komputer, dipasang pada titik yang dibutuhkan dalam pengambilan data.



Gambar 3.13. *pressure transmitter*

1. Merek : Druck
 Arus : 4-20 mA
 Ranges tekanan : 40 bar absolut
2. Merek : Siemens
 Arus : 4-20 mA
 Ranges Tekanan: 16 bar absolute

3.1.13 **Motor Listrik**

Alat ini berfungsi untuk memutarakan pompa power steering dengan menggunakan pully dan belt sebagai penghubung.

Daya motor listrik : 1 PK
 Sumber listrik : 1 Phase
 Volt/Hz : 220 volt/ 50 Hz



Gambar 3.14. motor listrik

3.1.14 Automatic Voltage Regulator

Alat ini berfungsi untuk mengatur tegangan. Didalam sistem rankine organik, alat ini berfungsi untuk mengatur tegangan dari motor listrik.

Merk : OKI
Model : AVR-500
Input : 50/60 Hz
Output : 110V/220V
Kapasitas : 500 VA



Gambar 3.15. Automatic Voltage Regulator

3.1.15 Data Akuisisi (NI-DAQ)

Alat ini berfungsi untuk mengukur parameter-parameter (temperatur/tekanan) yang ada pada sistem dengan berbasis komputer, dimana hasil pengukuran ditampilkan melalui monitor komputer.



Gambar 3.16 Data Akuisisi (DAQ)

Untuk pengukuran tekanan pada DAQ ini menggunakan signal dari arus sedangkan pengukuran temperatur dengan menggunakan signal tegangan.

3.2 Test Kebocoran

Setelah semua komponen sudah terpasang dengan baik (komponen sistem beserta alat ukur), maka terlebih dahulu dilakukan tes kebocoran dengan tujuan agar pada saat dijalankan sistem berjalan dengan baik tanpa mengganggu kinerja sistem. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

- Pastikan unit dalam keadaan off (tidak ada listrik yang mengalir)
- Sistem diisi dengan karbondioksida atau nitrogen sehingga sistem memiliki tekanan ± 8 bar
- Kebocoran terjadi apabila tekanannya menjadi turun dan dapat dilihat melalui NI Labview (DAQ) pada monitor komputer atau pressure gauge.
- Sistem pemipaan di tes dengan menggunakan busa sabun untuk mengetahui adanya kebocoran atau tidak
- Tandai setiap tempat yang menjadi indikasi kebocoran untuk diperbaiki.

3.3 Tahap Simulasi dan Pengambilan data

Setelah semua proses persiapan selesai, maka tshsp dimulasi data bisa dilakukan. Adapun prosedur simulasi data menggunakan *cycle tempo* ini adalah sebagai berikut :

- Mengaktifkan *software cycle tempo* dan pendukungnya
- Memanggil data file *apparatus* yang dibutuhkan didalam *cycle tempo* seperti skema diagram
- Menyiapkan properties karakteristik dan pendukungnya
- Mengaktifkan NI (DAQ) untuk membaca parameter-parameter yang ingin diukur saat aktualnya
- Mengoperasikan sistem *cycle tempo* dengan parameter aktualnya

Mengoperasikan sistem data file simulasi yang akan digunakan, setelah itu dijalankan programnya dan secara otomatis data akan terekam di komputer. Hal ini dilakukan dengan banyak percobaan hingga didapat data yang diinginkan, seperti data tekanan, temperatur *superheated*, dan *flowrate* fluida kerja.

BAB 4

ANALISA DAN PERCOBAAN ALAT UJI

Proses analisa alat uji pada sistem siklus rankine organik ini menggunakan software *cycle tempo* dan *refprop* sebagai pendukung didalam melakukan simulasi. Pada proses simulasi dibutuhkan sebuah kesamaan didalam beberapa komponen yang berhubungan dengan proses kerja pembangkit listrik dan proses kerja refrijerasi. Komponen yang digunakan didalam sistem siklus rankine ini terdiri dari pompa, *plate heat exchanger*, *liquid receiver*, *refrigerant accumulator*, dan Turbin.

Proses analisa alat uji juga dilakukan bersamaan dengan proses simulasi alat. Proses pengujian alat dilakukan setelah semua komponen terpasang didalam sistem ORC. Pengujian alat dilakukan beberapa kali dengan menggunakan fluida kerja R-22. Namun, didalam percobaan alat uji terdapat beberapa masalah dari kebocoran pada sistem hingga melakukan penggantian komponen pada sistem. Hal tersebut terjadi karena didalam sistem harus dalam keadaan tidak bocor dan ada pula komponen yang tidak sesuai dalam pengoperasian sistem ORC. Sehingga, penekanan analisa ditujukan pada proses simulasi *cycle tempo*.

Tabel 4.1 Hasil Percobaan Alat Uji Pertama

No	Permasalahan	Bagian	Tindakan
1.	Kebocoran	Nut dan napple	Pengucian dilakukan dengan seal tape dan lock tight
2.	Kebocoran	Pompa	Dilakukan pengeleman
3.	Komponen tidak berfungsi	Pompa	Penggantian pompa magnetic dengan pompa power steering dengan penggerak motor listrik

Tabel 4.2 Hasil Percobaan Alat Uji Kedua

No	Permasalahan	Bagian	Tindakan
1.	Kebocoran	Turbin	Penggantian screwdriver dengan turbocharger
2.	Fungsi komponen tidak berputar	Turbin	Pengamatan terhadap komponen yang tidak berfungsi
3.	Kebocoran	Turbin	Belum mendapatkan solusi

Permasalahan yang terjadi pada percobaan pertama dan kedua terjadi akibat kebocoran didalam sistem, kemudian fungsi turbin tidak dapat berfungsi, karena penggunaan screwdriver sebagai turbin tidak sesuai dengan sistem yang diinginkan. Hal ini terjadi karena fluida kerja yang digunakan tidak dapat berubah fase dari uap-jenuh ke fase cair-jenuh setelah terjadi ekspansi dan kondensasi. Hal ini menyebabkan pompa tidak dapat melakukan fungsi untuk menghisap dan mendorong fluida kerja pada saat fase cair yang diinginkan. Hal tersebut mengakibatkan fluida kerja yang masih berfase uap jenuh tersebut menahan kerja turbin karena adanya tekanan balik.

Setelah dilakukan penggantian screwdriver dengan turbocharger dan penggantian pipa yang digunakan didalam sistem diganti dari ukuran 3/8 inch ke 1 inch agar sesuai dengan inlet turbin-turbocharger. Namun, turbocharger tetap tidak dapat berputar karena tekanan dan flowrate yang dibutuhkan untuk memutar turbocharger tidaklah tercapai.

4.1 Proses Analisa Fluida Kerja Sistem ORC

Pada sistem alat ini proses penganalisaan performansi alat uji menggunakan *software cycle tempo*. Analisa yang dilakukan dengan cara memvariasikan kondisi temperatur dan tekanan pada kondisi aktualnya berdasarkan propertis fluida kerjanya yaitu R-22. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui karakteristik dan unjuk kerja sistem siklus rankine organik yang

dibentuk. Proses pembentukan karakteristik fluida kerja menggunakan data Repfrop, yaitu :

1. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 20^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 20°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≥ 9 bar dengan volume fluida kerja $0.026346\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 10 bar.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	20.000	1.000	3.6027	0.27757	398.29	426.05	1.9724	0.55325	0.65683	Superheated
2	20.000	2.000	7.3227	0.13656	397.21	424.52	1.9020	0.55927	0.67114	Superheated
3	20.000	3.000	11.171	0.09515	396.08	422.94	1.8592	0.56566	0.68636	Superheated
4	20.000	4.000	15.162	0.065954	394.92	421.30	1.8274	0.57248	0.70427	Superheated
5	20.000	5.000	19.311	0.051783	393.70	419.59	1.8017	0.57983	0.72374	Superheated
6	20.000	6.000	23.638	0.042305	392.43	417.81	1.7797	0.58785	0.74579	Superheated
7	20.000	7.000	28.167	0.035503	391.09	415.94	1.7601	0.59672	0.77116	Superheated
8	20.000	8.000	32.927	0.030371	389.67	413.97	1.7422	0.60672	0.80086	Superheated
9	20.000	9.000	37.957	0.026346	388.16	411.88	1.7254	0.61822	0.83642	Superheated
10	20.000	9.1002	38.477	0.025989	388.01	411.66	1.7238	0.61947	0.84038	1.0000
11	20.000	9.1002	1209.9	0.00082651	223.31	224.06	1.0838	0.68638	1.2356	0.00000
12	20.000	10.000	1210.4	0.00082616	223.24	224.06	1.0836	0.68636	1.2346	Subcooled
13	20.000	11.000	1211.0	0.00082578	223.16	224.07	1.0833	0.68633	1.2334	Subcooled
14	20.000	12.000	1211.5	0.00082540	223.08	224.07	1.0830	0.68631	1.2323	Subcooled
15	20.000	13.000	1212.1	0.00082502	223.00	224.08	1.0828	0.68628	1.2312	Subcooled
16	20.000	14.000	1212.6	0.00082465	222.93	224.08	1.0825	0.68626	1.2301	Subcooled
17	20.000	15.000	1213.2	0.00082427	222.85	224.09	1.0822	0.68623	1.2290	Subcooled
18	20.000	16.000	1213.7	0.00082390	222.77	224.09	1.0820	0.68621	1.2279	Subcooled
19	20.000	17.000	1214.3	0.00082353	222.70	224.10	1.0817	0.68618	1.2268	Subcooled
20	20.000	18.000	1214.8	0.00082316	222.62	224.10	1.0815	0.68616	1.2258	Subcooled
21	20.000	19.000	1215.4	0.00082280	222.55	224.11	1.0812	0.68614	1.2247	Subcooled
22	20.000	20.000	1215.9	0.00082243	222.47	224.12	1.0809	0.68612	1.2237	Subcooled
23	20.000	21.000	1216.4	0.00082207	222.40	224.12	1.0807	0.68610	1.2226	Subcooled
24	20.000	22.000	1217.0	0.00082171	222.32	224.13	1.0804	0.68608	1.2216	Subcooled

Gambar 4.1 karakteristik fluida kerja R-22 $T = 20^{\circ}\text{C}$

2. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 23^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 23°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 9 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.026831\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 10 bar.

16: R22: T = 23.0 °C

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	23.000	1.0000	3.5643	0.28056	428.02	1.9791	0.55654	0.65984	Superheated
2	23.000	2.0000	7.2403	0.13812	426.54	1.9089	0.56227	0.67351	Superheated
3	23.000	3.0000	11.038	0.090594	425.00	1.8662	0.56832	0.68845	Superheated
4	23.000	4.0000	14.971	0.066797	423.41	1.8346	0.57476	0.70490	Superheated
5	23.000	5.0000	19.052	0.052489	421.76	1.8091	0.58165	0.72318	Superheated
6	23.000	6.0000	23.299	0.042921	420.04	1.7873	0.58912	0.74371	Superheated
7	23.000	7.0000	27.733	0.036059	418.25	1.7679	0.59728	0.76705	Superheated
8	23.000	8.0000	32.379	0.030884	416.36	1.7503	0.60635	0.79402	Superheated
9	23.000	9.0000	37.270	0.026831	414.37	1.7338	0.61660	0.82573	Superheated
10	23.000	9.8872	41.849	0.023896	412.50	1.7199	0.62698	0.85916	1.0000
11	23.000	9.8872	1198.4	0.00083442	227.78	1.0962	0.68904	1.2481	0.00000
12	23.000	10.000	1198.5	0.00083438	227.79	1.0962	0.68904	1.2479	Subcooled
13	23.000	11.000	1199.1	0.00083396	227.79	1.0959	0.68900	1.2466	Subcooled
14	23.000	12.000	1199.7	0.00083355	227.79	1.0956	0.68897	1.2454	Subcooled
15	23.000	13.000	1200.3	0.00083314	227.79	1.0954	0.68893	1.2441	Subcooled
16	23.000	14.000	1200.9	0.00083273	227.79	1.0951	0.68889	1.2429	Subcooled
17	23.000	15.000	1201.4	0.00083233	227.79	1.0948	0.68887	1.2417	Subcooled
18	23.000	16.000	1202.0	0.00083193	227.79	1.0945	0.68883	1.2405	Subcooled
19	23.000	17.000	1202.6	0.00083153	227.80	1.0943	0.68880	1.2393	Subcooled

Gambar 4.2 karakteristik fluida kerja R-22 T = 23° C

3. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat T = 25° C.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 25° C, keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 10 bar dengan volume fluida kerja ≤ 0.023862 m³/kg. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 11 bar.

18: R22: T = 25.0 °C

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	25.000	1.0000	3.5392	0.28255	401.09	429.34	1.9836	0.55874	0.66185	Superheated
2	25.000	2.0000	7.1865	0.13915	400.05	427.88	1.9134	0.56428	0.67511	Superheated
3	25.000	3.0000	10.952	0.091310	398.99	426.38	1.8700	0.57012	0.68957	Superheated
4	25.000	4.0000	14.846	0.067357	397.86	424.82	1.8394	0.57632	0.70543	Superheated
5	25.000	5.0000	18.884	0.052955	396.73	423.21	1.8140	0.58294	0.72298	Superheated
6	25.000	6.0000	23.080	0.043326	395.53	421.53	1.7929	0.59006	0.74259	Superheated
7	25.000	7.0000	27.454	0.036425	394.28	419.78	1.7731	0.59781	0.76474	Superheated
8	25.000	8.0000	32.029	0.031222	392.97	417.94	1.7556	0.60635	0.79011	Superheated
9	25.000	9.0000	36.835	0.027148	391.58	416.01	1.7394	0.61590	0.81966	Superheated
10	25.000	10.000	41.908	0.023862	390.11	413.97	1.7240	0.62677	0.85473	Superheated
11	25.000	10.439	44.232	0.022608	389.43	413.03	1.7174	0.63207	0.87237	1.0000
12	25.000	10.439	1190.7	0.00083967	229.41	230.29	1.1045	0.69086	1.2568	0.00000
13	25.000	11.000	1191.0	0.00083963	229.36	230.29	1.1043	0.69084	1.2561	Subcooled
14	25.000	12.000	1191.6	0.00083919	229.28	230.29	1.1041	0.69080	1.2547	Subcooled
15	25.000	13.000	1192.2	0.00083876	229.19	230.29	1.1038	0.69076	1.2534	Subcooled
16	25.000	14.000	1192.8	0.00083833	229.11	230.28	1.1035	0.69072	1.2520	Subcooled
17	25.000	15.000	1193.5	0.00083790	229.03	230.28	1.1032	0.69068	1.2507	Subcooled
18	25.000	16.000	1194.1	0.00083748	228.94	230.28	1.1029	0.69064	1.2494	Subcooled
19	25.000	17.000	1194.7	0.00083706	228.86	230.28	1.1026	0.69061	1.2481	Subcooled
20	25.000	18.000	1195.3	0.00083664	228.78	230.28	1.1024	0.69057	1.2469	Subcooled
21	25.000	19.000	1195.9	0.00083622	228.69	230.28	1.1021	0.69053	1.2456	Subcooled
22	25.000	20.000	1196.5	0.00083580	228.61	230.28	1.1019	0.69050	1.2444	Subcooled
23	25.000	21.000	1197.0	0.00083539	228.53	230.29	1.1015	0.69046	1.2431	Subcooled
24	25.000	22.000	1197.6	0.00083498	228.45	230.29	1.1013	0.69043	1.2419	Subcooled

Gambar 4.3 karakteristik fluida kerja R-22 T = 25° C

4. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 30^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 30°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 11 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.021858\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 12 bar.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg·K)	Cv (kJ/kg·K)	Cp (kJ/kg·K)	Quality (kg/kg)
1	30.000	1.0000	3.4779	0.28753	403.91	432.66	1.9946	0.56423	0.66693	Superheated
2	30.000	2.0000	7.0558	0.14173	402.92	431.27	1.9247	0.56833	0.67923	Superheated
3	30.000	3.0000	10.742	0.093092	401.91	429.83	1.8823	0.57469	0.69256	Superheated
4	30.000	4.0000	14.546	0.068745	400.85	428.35	1.8511	0.58034	0.70708	Superheated
5	30.000	5.0000	18.480	0.054112	399.77	426.82	1.8269	0.58633	0.72300	Superheated
6	30.000	6.0000	22.556	0.044333	398.64	425.24	1.8046	0.59272	0.74050	Superheated
7	30.000	7.0000	26.791	0.037328	397.46	423.59	1.7858	0.59958	0.75817	Superheated
8	30.000	8.0000	31.202	0.032050	396.23	421.87	1.7687	0.60701	0.78223	Superheated
9	30.000	9.0000	35.812	0.027924	394.95	420.08	1.7529	0.61516	0.80737	Superheated
10	30.000	10.000	40.649	0.024601	393.59	418.19	1.7380	0.62420	0.83645	Superheated
11	30.000	11.000	45.749	0.021858	392.16	416.20	1.7238	0.63438	0.87066	Superheated
12	30.000	11.919	50.705	0.019722	390.76	414.26	1.7111	0.64502	0.90512	1.0000
13	30.000	11.919	1170.7	0.00085416	235.61	236.62	1.1252	0.69561	1.2807	0.00000
14	30.000	12.000	1170.0	0.00085412	235.60	236.62	1.1251	0.69561	1.2805	Subcooled
15	30.000	13.000	1171.5	0.00085382	235.50	236.61	1.1248	0.69555	1.2789	Subcooled
16	30.000	14.000	1172.2	0.00085312	235.41	236.61	1.1246	0.69549	1.2773	Subcooled
17	30.000	15.000	1172.8	0.00085263	235.32	236.60	1.1242	0.69543	1.2757	Subcooled
18	30.000	16.000	1173.5	0.00085214	235.23	236.59	1.1239	0.69538	1.2741	Subcooled
19	30.000	17.000	1174.2	0.00085165	235.14	236.58	1.1236	0.69532	1.2725	Subcooled
20	30.000	18.000	1174.9	0.00085117	235.04	236.58	1.1233	0.69527	1.2710	Subcooled
21	30.000	19.000	1175.5	0.00085069	234.95	236.57	1.1230	0.69522	1.2695	Subcooled
22	30.000	20.000	1176.2	0.00085021	234.86	236.56	1.1227	0.69516	1.2680	Subcooled
23	30.000	21.000	1176.8	0.00084974	234.77	236.56	1.1224	0.69511	1.2665	Subcooled
24	30.000	22.000	1177.5	0.00084927	234.68	236.55	1.1221	0.69506	1.2650	Subcooled

Gambar 4.4 karakteristik fluida kerja R-22 $T = 30^{\circ}\text{C}$

5. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 35^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 35°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 13 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.018222\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 14 bar.

R-22 T = 35.0 °C

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	35.000	1.0000	3.4189	0.29249	406.76	436.01	2.0056	0.56972	0.67203	Superheated
2	35.000	2.0000	6.9304	0.14429	405.82	434.68	1.9358	0.57443	0.68348	Superheated
3	35.000	3.0000	10.542	0.094662	404.85	433.30	1.8937	0.57935	0.69581	Superheated
4	35.000	4.0000	14.261	0.070121	403.84	431.89	1.8627	0.58452	0.70914	Superheated
5	35.000	5.0000	18.098	0.055255	402.81	430.44	1.8378	0.58997	0.72365	Superheated
6	35.000	6.0000	22.064	0.045324	401.74	428.94	1.8167	0.59573	0.73953	Superheated
7	35.000	7.0000	26.170	0.038211	400.63	427.38	1.7982	0.60186	0.75702	Superheated
8	35.000	8.0000	30.434	0.032658	399.48	425.77	1.7814	0.60842	0.77644	Superheated
9	35.000	9.0000	34.871	0.028677	398.28	424.09	1.7660	0.61550	0.79823	Superheated
10	35.000	10.000	39.504	0.025314	397.03	422.34	1.7516	0.62321	0.82293	Superheated
11	35.000	11.000	44.360	0.022543	395.71	420.50	1.7379	0.63170	0.85129	Superheated
12	35.000	12.000	49.470	0.020214	394.31	418.57	1.7247	0.64116	0.88435	Superheated
13	35.000	13.000	54.879	0.018222	392.83	416.52	1.7118	0.65186	0.92363	Superheated
14	35.000	13.548	57.980	0.017245	391.98	415.34	1.7048	0.65830	0.94854	1.0000
15	35.000	13.548	1150.1	0.00086852	241.89	243.07	1.1458	0.70063	1.3077	0.00000
16	35.000	14.000	1150.4	0.00086825	241.85	243.06	1.1456	0.70060	1.3068	Subcooled
17	35.000	15.000	1151.2	0.00086868	241.74	243.05	1.1453	0.70052	1.3048	Subcooled
18	35.000	16.000	1151.9	0.00086810	241.64	243.03	1.1450	0.70044	1.3029	Subcooled
19	35.000	17.000	1152.7	0.00086753	241.54	243.01	1.1446	0.70036	1.3009	Subcooled
20	35.000	18.000	1153.4	0.00086697	241.44	243.00	1.1443	0.70029	1.2990	Subcooled
21	35.000	19.000	1154.2	0.00086641	241.34	242.98	1.1440	0.70021	1.2972	Subcooled
22	35.000	20.000	1154.9	0.00086586	241.24	242.97	1.1436	0.70014	1.2953	Subcooled
23	35.000	21.000	1155.7	0.00086531	241.14	242.96	1.1433	0.70007	1.2935	Subcooled
24	35.000	22.000	1156.4	0.00086476	241.04	242.94	1.1430	0.70000	1.2917	Subcooled

Gambar 4.5 karakteristik fluida kerja R-22 T = 35° C

6. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat T = 40° C.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 40° C, keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 15 bar dengan volume fluida kerja ≤ 0.015580 m³/kg. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 16 bar.

R-22 T = 40.0 °C

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
5	40.000	5.0000	17.735	0.056385	405.07	434.06	1.8495	0.59380	0.72463	Superheated
6	40.000	6.0000	21.598	0.046300	404.85	432.63	1.8286	0.59902	0.73825	Superheated
7	40.000	7.0000	25.588	0.039081	403.81	431.16	1.8103	0.60454	0.75499	Superheated
8	40.000	8.0000	29.717	0.033450	402.72	429.64	1.7939	0.61039	0.77228	Superheated
9	40.000	9.0000	34.000	0.029401	401.60	428.07	1.7788	0.61653	0.79141	Superheated
10	40.000	10.000	38.454	0.026005	400.42	426.43	1.7648	0.62333	0.81277	Superheated
11	40.000	11.000	43.099	0.023203	399.20	424.72	1.7515	0.63059	0.83684	Superheated
12	40.000	12.000	47.958	0.020851	397.92	422.94	1.7388	0.63851	0.86428	Superheated
13	40.000	13.000	53.065	0.018845	396.57	421.07	1.7265	0.64726	0.89588	Superheated
14	40.000	14.000	58.457	0.017107	395.14	419.09	1.7144	0.65703	0.93320	Superheated
15	40.000	15.000	64.184	0.015580	393.61	416.98	1.7025	0.66810	0.97777	Superheated
16	40.000	15.336	66.193	0.015107	393.08	416.25	1.6985	0.67218	0.99483	1.0000
17	40.000	15.336	1128.5	0.00088611	248.29	249.65	1.1665	0.70595	1.3389	0.00000
18	40.000	16.000	1129.1	0.00088566	248.21	249.63	1.1662	0.70587	1.3373	Subcooled
19	40.000	17.000	1130.0	0.00088498	248.10	249.60	1.1658	0.70577	1.3348	Subcooled
20	40.000	18.000	1130.8	0.00088431	247.98	249.58	1.1655	0.70566	1.3324	Subcooled
21	40.000	19.000	1131.7	0.00088365	247.87	249.55	1.1651	0.70556	1.3300	Subcooled
22	40.000	20.000	1132.5	0.00088300	247.76	249.53	1.1648	0.70546	1.3277	Subcooled
23	40.000	21.000	1133.3	0.00088235	247.65	249.50	1.1644	0.70536	1.3254	Subcooled
24	40.000	22.000	1134.2	0.00088170	247.54	249.48	1.1640	0.70527	1.3231	Subcooled
25	40.000	23.000	1135.0	0.00088107	247.43	249.45	1.1637	0.70517	1.3209	Subcooled
26	40.000	24.000	1135.8	0.00088043	247.32	249.43	1.1633	0.70508	1.3187	Subcooled
27	40.000	25.000	1136.6	0.00087981	247.21	249.41	1.1630	0.70499	1.3166	Subcooled
28	40.000	26.000	1137.4	0.00087919	247.10	249.39	1.1626	0.70490	1.3144	Subcooled

Gambar 4.6 karakteristik fluida kerja R-22 T = 40° C

7. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 45^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 45°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 17 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.013585\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 18 bar.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
9	45.000	9.0000	33.190	0.030130	404.89	432.01	1.7913	0.61835	0.78637	Superheated
10	45.000	10.000	37.484	0.026678	403.79	430.47	1.7776	0.62425	0.80509	Superheated
11	45.000	11.000	41.943	0.023942	402.65	428.88	1.7647	0.63057	0.82589	Superheated
12	45.000	12.000	46.588	0.021455	401.46	427.22	1.7523	0.63736	0.84919	Superheated
13	45.000	13.000	51.440	0.019440	400.22	425.49	1.7405	0.64472	0.87556	Superheated
14	45.000	14.000	56.529	0.017690	398.92	423.68	1.7290	0.65277	0.90575	Superheated
15	45.000	15.000	61.888	0.016158	397.54	421.78	1.7177	0.66166	0.94080	Superheated
16	45.000	16.000	67.562	0.014801	396.08	419.76	1.7065	0.67161	0.98219	Superheated
17	45.000	17.000	73.609	0.013585	394.52	417.61	1.6952	0.68289	1.0321	Superheated
18	45.000	17.292	75.457	0.013253	394.04	418.95	1.6919	0.68649	1.0487	1.0000
19	45.000	17.292	1106.0	0.00090416	254.80	256.36	1.1872	0.71157	1.3755	0.00000
20	45.000	18.000	1106.7	0.00090359	254.71	256.34	1.1869	0.71147	1.3733	Subcooled
21	45.000	19.000	1107.7	0.00090279	254.58	256.30	1.1865	0.71134	1.3701	Subcooled
22	45.000	20.000	1108.6	0.00090200	254.45	256.26	1.1861	0.71120	1.3671	Subcooled
23	45.000	21.000	1109.5	0.00090122	254.33	256.22	1.1857	0.71107	1.3641	Subcooled
24	45.000	22.000	1110.6	0.00090045	254.20	256.19	1.1853	0.71093	1.3612	Subcooled
25	45.000	23.000	1111.5	0.00089969	254.08	256.15	1.1849	0.71081	1.3583	Subcooled
26	45.000	24.000	1112.4	0.00089893	253.96	256.12	1.1845	0.71068	1.3555	Subcooled
27	45.000	25.000	1113.4	0.00089819	253.84	256.08	1.1841	0.71056	1.3527	Subcooled
28	45.000	26.000	1114.3	0.00089745	253.71	256.05	1.1837	0.71044	1.3500	Subcooled
29	45.000	27.000	1115.2	0.00089671	253.59	256.02	1.1833	0.71032	1.3474	Subcooled
30	45.000	28.000	1116.1	0.00089599	253.48	255.98	1.1830	0.71020	1.3447	Subcooled
31	45.000	29.000	1117.0	0.00089527	253.36	255.95	1.1826	0.71009	1.3422	Subcooled

Gambar 4.7 karakteristik fluida kerja R-22 $T = 45^{\circ}\text{C}$

8. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 50^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 50°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 19 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.012035\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 20 bar.

21: R22: T = 50.0 °C										
	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
6	50.000	6.0000	20.739	0.048219	411.10	440.03	1.8519	0.60627	0.74053	Superheated
7	50.000	7.0000	24.521	0.040782	410.15	438.70	1.8340	0.61080	0.75350	Superheated
8	50.000	8.0000	28.415	0.035192	409.18	437.34	1.8181	0.61555	0.76751	Superheated
9	50.000	9.0000	32.432	0.030834	408.18	435.93	1.8036	0.62053	0.78273	Superheated
10	50.000	10.000	36.582	0.027336	407.15	434.48	1.7901	0.62579	0.79932	Superheated
11	50.000	11.000	40.877	0.024464	406.08	432.99	1.7775	0.63135	0.81754	Superheated
12	50.000	12.000	45.333	0.022059	404.97	431.44	1.7655	0.63727	0.83767	Superheated
13	50.000	13.000	49.968	0.020013	403.81	429.83	1.7540	0.64360	0.86009	Superheated
14	50.000	14.000	54.801	0.018248	402.61	428.16	1.7429	0.65041	0.88527	Superheated
15	50.000	15.000	59.858	0.016706	401.35	426.41	1.7321	0.65780	0.91386	Superheated
16	50.000	16.000	65.171	0.015344	400.03	424.58	1.7215	0.66588	0.94670	Superheated
17	50.000	17.000	70.778	0.014129	398.63	422.65	1.7109	0.67480	0.98497	Superheated
18	50.000	18.000	76.729	0.013033	397.14	420.60	1.7004	0.68477	1.0304	Superheated
19	50.000	19.000	83.090	0.012035	395.55	418.42	1.6898	0.69607	1.0953	Superheated
20	50.000	19.427	85.952	0.011634	394.63	417.44	1.6852	0.70139	1.1126	1.0000
21	50.000	19.427	1082.3	0.00092396	261.45	263.25	1.2080	0.71756	1.4191	0.00000
22	50.000	20.000	1083.0	0.00092340	261.37	263.21	1.2078	0.71745	1.4168	Subcooled
23	50.000	21.000	1084.1	0.00092244	261.22	263.16	1.2073	0.71727	1.4127	Subcooled
24	50.000	22.000	1085.2	0.00092150	261.08	263.11	1.2069	0.71709	1.4088	Subcooled
25	50.000	23.000	1086.3	0.00092057	260.94	263.05	1.2064	0.71692	1.4049	Subcooled
26	50.000	24.000	1087.4	0.00091964	260.80	263.00	1.2060	0.71674	1.4012	Subcooled
27	50.000	25.000	1088.5	0.00091873	260.66	262.95	1.2055	0.71658	1.3975	Subcooled
28	50.000	26.000	1089.5	0.00091783	260.52	262.90	1.2051	0.71641	1.3939	Subcooled
29	50.000	27.000	1090.6	0.00091695	260.38	262.86	1.2047	0.71625	1.3904	Subcooled

Gambar 4.8 karakteristik fluida kerja R-22 T = 50°C

9. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat T = 60°C.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 60°C, keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 24 bar dengan volume fluida kerja ≤ 0.00914 m³/kg. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 25 bar.

22: R22: T = 60.0 °C										
	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
15	60.000	15.000	56.386	0.017735	408.75	435.35	1.7594	0.65479	0.87803	Superheated
16	60.000	16.000	61.150	0.016393	407.63	433.79	1.7496	0.66058	0.90069	Superheated
17	60.000	17.000	66.114	0.015125	406.46	432.17	1.7400	0.66677	0.92597	Superheated
18	60.000	18.000	71.301	0.014025	405.24	430.49	1.7305	0.67341	0.95446	Superheated
19	60.000	19.000	76.740	0.013031	403.96	428.72	1.7212	0.68060	0.98687	Superheated
20	60.000	20.000	82.468	0.012126	402.62	426.87	1.7119	0.68943	1.0242	Superheated
21	60.000	21.000	88.530	0.011296	401.20	424.92	1.7025	0.69705	1.0670	Superheated
22	60.000	22.000	94.984	0.010528	399.59	422.85	1.6930	0.70562	1.1197	Superheated
23	60.000	23.000	101.91	0.0098127	398.06	420.63	1.6835	0.71741	1.1828	Superheated
24	60.000	24.000	109.41	0.0091400	396.31	418.24	1.6733	0.72977	1.2618	Superheated
25	60.000	24.275	111.58	0.0089613	395.80	417.55	1.6705	0.73350	1.2872	1.0000
26	60.000	24.275	1030.4	0.00097051	275.26	277.61	1.2504	0.73084	1.5392	0.00000
27	60.000	25.000	1031.5	0.00096944	275.11	277.54	1.2500	0.73061	1.5337	Subcooled
28	60.000	26.000	1033.1	0.00096798	274.92	277.44	1.2494	0.73029	1.5283	Subcooled
29	60.000	27.000	1034.6	0.00096655	274.73	277.34	1.2488	0.72998	1.5191	Subcooled
30	60.000	28.000	1036.1	0.00096514	274.54	277.25	1.2482	0.72969	1.5122	Subcooled
31	60.000	29.000	1037.6	0.00096376	274.36	277.15	1.2477	0.72940	1.5055	Subcooled
32	60.000	30.000	1039.1	0.00096241	274.17	277.06	1.2471	0.72911	1.4991	Subcooled
33	60.000	31.000	1040.5	0.00096107	273.99	276.97	1.2465	0.72884	1.4928	Subcooled
34	60.000	32.000	1041.9	0.00095977	273.82	276.89	1.2460	0.72857	1.4868	Subcooled
35	60.000	33.000	1043.3	0.00095848	273.64	276.80	1.2455	0.72831	1.4809	Subcooled
36	60.000	34.000	1044.7	0.00095721	273.47	276.72	1.2449	0.72806	1.4752	Subcooled
37	60.000	35.000	1046.1	0.00095597	273.30	276.64	1.2444	0.72781	1.4697	Subcooled
38	60.000	36.000	1047.4	0.00095474	273.13	276.56	1.2439	0.72757	1.4644	Subcooled
39	60.000	37.000	1048.7	0.00095354	272.96	276.49	1.2434	0.72733	1.4592	Subcooled

Gambar 4.9 karakteristik fluida kerja R-22 T = 60°C

10. Karakteristik fluida kerja R-22 pada saat $T = 80^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja R-22 memiliki karakteristik pada saat temperaturnya 80°C , keadaan fase *superheated*nya cukup dengan tekanan ≤ 36 bar dengan volume fluida kerja $\leq 0.005378\text{ m}^3/\text{kg}$. Kemudian, proses perubahan fase fluida kerja agar menjadi *subcooled* dengan kondisi temperatur yang sama dibutuhkan tekanan ≥ 37 bar.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cv (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
20	80.000	20.000	72.387	0.013815	446.13	1.7680	0.62766	0.91971	Superheated
21	80.000	21.000	77.075	0.012974	444.74	1.7603	0.68197	0.93086	Superheated
22	80.000	22.000	81.926	0.012206	443.32	1.7527	0.68647	0.95974	Superheated
23	80.000	23.000	86.955	0.011500	441.86	1.7452	0.69121	0.98262	Superheated
24	80.000	24.000	92.180	0.010848	440.34	1.7378	0.69619	1.0078	Superheated
25	80.000	25.000	97.623	0.010244	438.77	1.7303	0.70146	1.0358	Superheated
26	80.000	26.000	103.31	0.0096799	437.14	1.7229	0.70706	1.0670	Superheated
27	80.000	27.000	109.26	0.0091523	435.44	1.7154	0.71302	1.1023	Superheated
28	80.000	28.000	115.52	0.0086562	433.66	1.7079	0.71941	1.1423	Superheated
29	80.000	29.000	122.14	0.0081876	431.80	1.7002	0.72631	1.1884	Superheated
30	80.000	30.000	129.15	0.0077426	429.84	1.6924	0.73379	1.2422	Superheated
31	80.000	31.000	136.85	0.0073180	427.76	1.6844	0.74200	1.3059	Superheated
32	80.000	32.000	144.71	0.0069101	425.54	1.6761	0.75109	1.3831	Superheated
33	80.000	33.000	153.48	0.0065156	423.15	1.6674	0.76129	1.4790	Superheated
34	80.000	34.000	163.12	0.0061305	420.54	1.6582	0.77295	1.6023	Superheated
35	80.000	35.000	173.31	0.0057501	417.66	1.6484	0.78656	1.7684	Superheated
36	80.000	36.000	186.30	0.0053675	414.39	1.6376	0.80300	2.0085	Superheated
37	80.000	36.636	195.40	0.0051176	412.01	1.6299	0.81565	2.2308	1.0000
38	80.000	36.538	893.74	0.0011189	310.44	1.3423	0.76798	2.1814	0.0000
39	80.000	37.000	895.38	0.0011168	310.29	1.3417	0.76745	2.1599	Subcooled
40	80.000	38.000	899.74	0.0011114	309.89	1.3403	0.76603	2.1059	Subcooled
41	80.000	39.000	903.85	0.0011064	309.51	1.3389	0.76473	2.0584	Subcooled
42	80.000	40.000	907.76	0.0011016	309.16	1.3376	0.76353	2.0162	Subcooled
43	80.000	41.000	911.49	0.0010971	308.83	1.3363	0.76242	1.9783	Subcooled
44	80.000	42.000	915.05	0.0010926	308.51	1.3351	0.76138	1.9442	Subcooled
45	80.000	43.000	918.46	0.0010888	308.21	1.3340	0.76041	1.9131	Subcooled

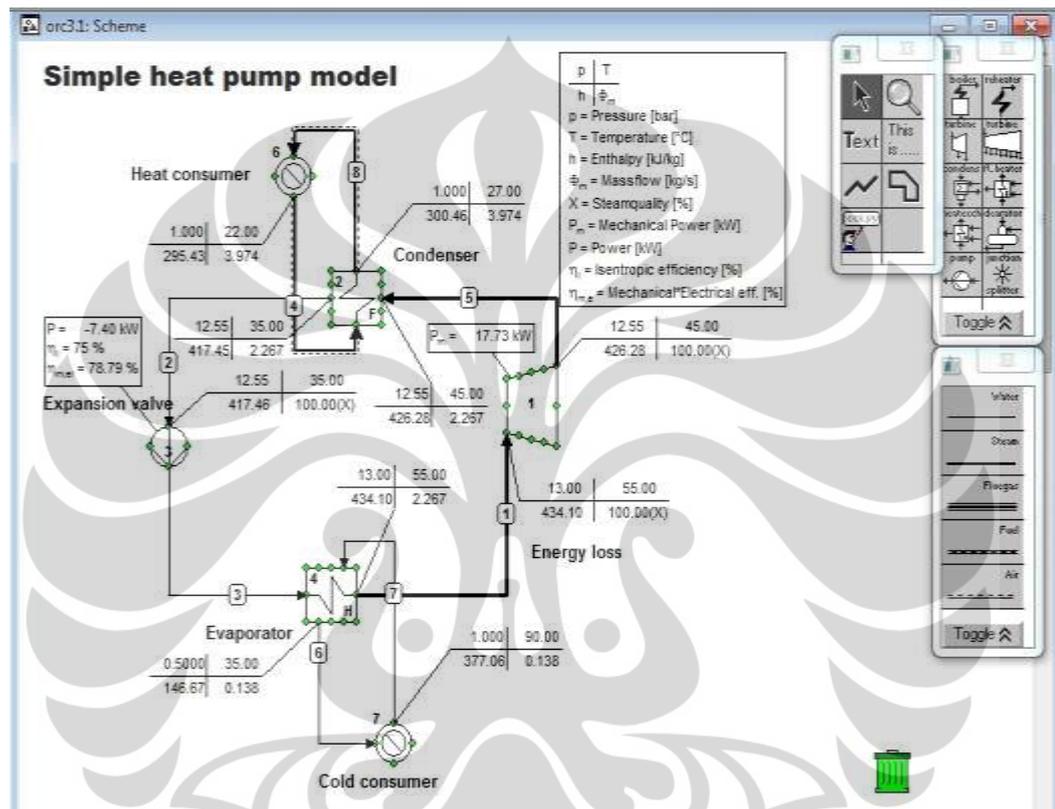
Gambar 4.10 karakteristik fluida kerja R-22 $T = 80^{\circ}\text{C}$

4.2 Analisa Sistem *Organic Rankine Cycle* Dengan *Cycle Tempo*

Analisa sistem kerja siklus rankine organik ini menggunakan *software cycle tempo*. Analisa ini dilakukan dengan cara memvariasikan tekanan yang masuk turbin terhadap unjuk kerja turbin dengan temperatur yang diinginkan menggunakan fluida kerja R-22. Penggunaan *cycle tempo* dilakukan dengan cara membuat diagram yang dilengkapi dengan parameter yang sesuai dengan aktual sistem siklus rankine organik. Hal ini dilakukan agar didapat hasil uji unjuk kerja dari komponen-komponen yang digunakan dalam kondisi aktualnya. Berikut ini merupakan hasil percobaan analisa *cycle tempo* dengan memvariasikan tekanan masuk dan temperatur *superheated* turbin :

2. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13$ Bar dan $T_{in} = 55^{\circ}C$

Kedadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 17,73$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 55^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

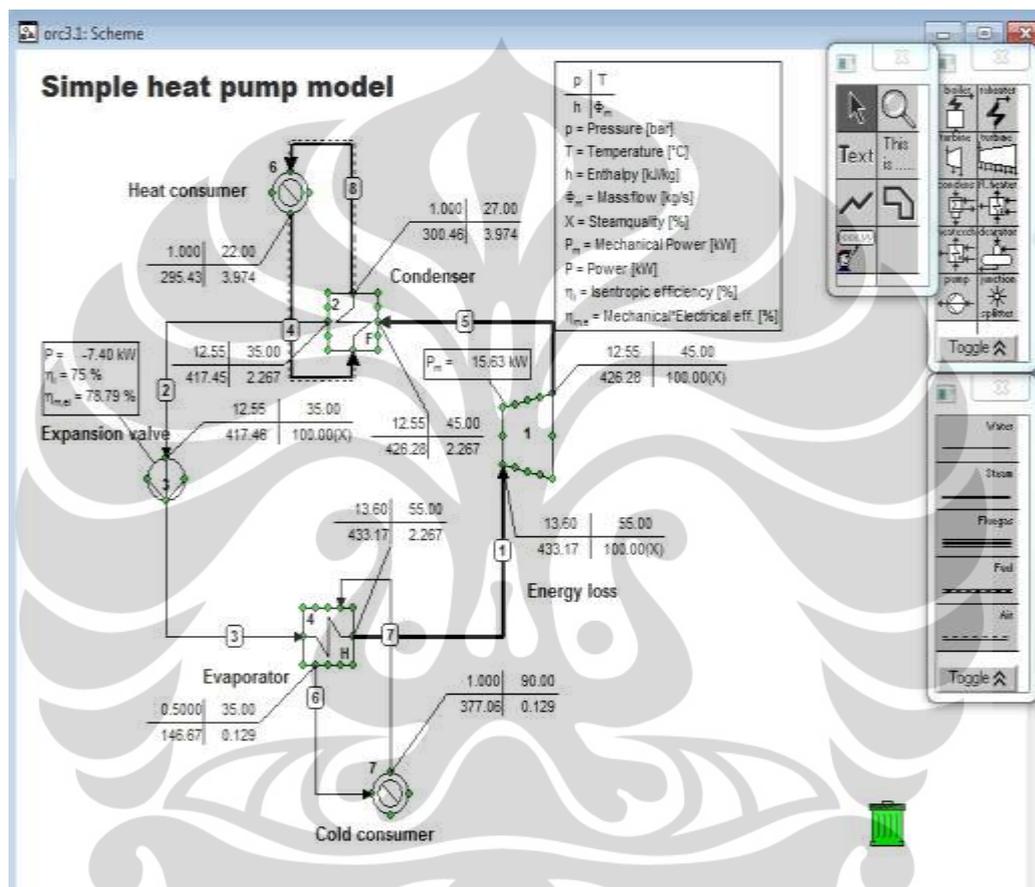


Gambar 4.12 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

3. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 55^{\circ}C$

Keadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 15,63$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13,6$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 55^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

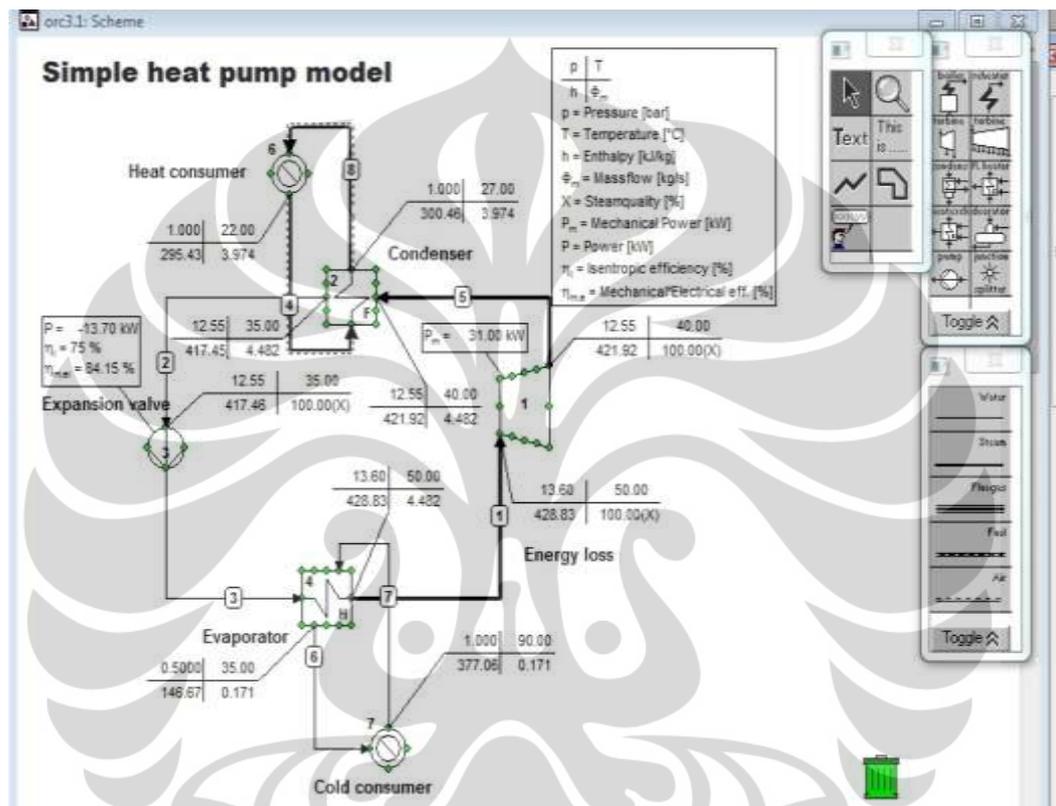


Gambar 4.13 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

4. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 50^{\circ}C$

Keadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 31$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13,6$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 50^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

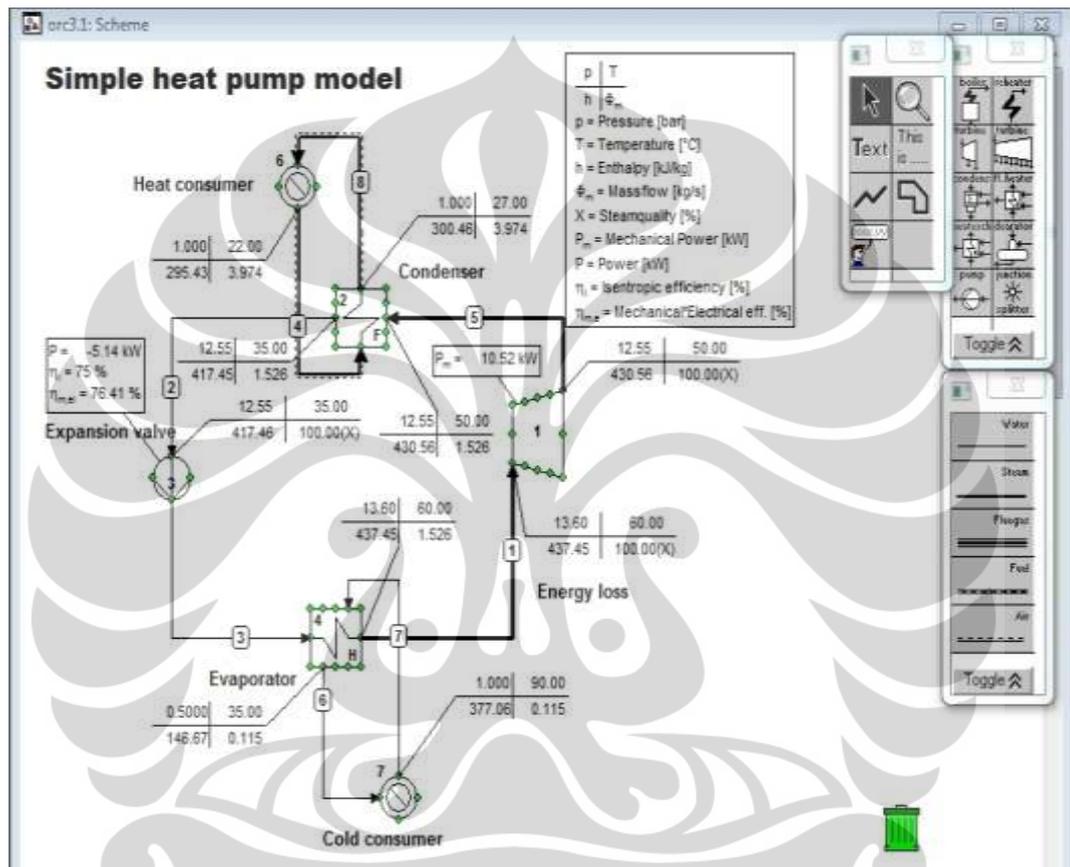


Gambar 4.14 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 50^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

5. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 60^{\circ}C$

Kedadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 10,52$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13,6$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 60^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

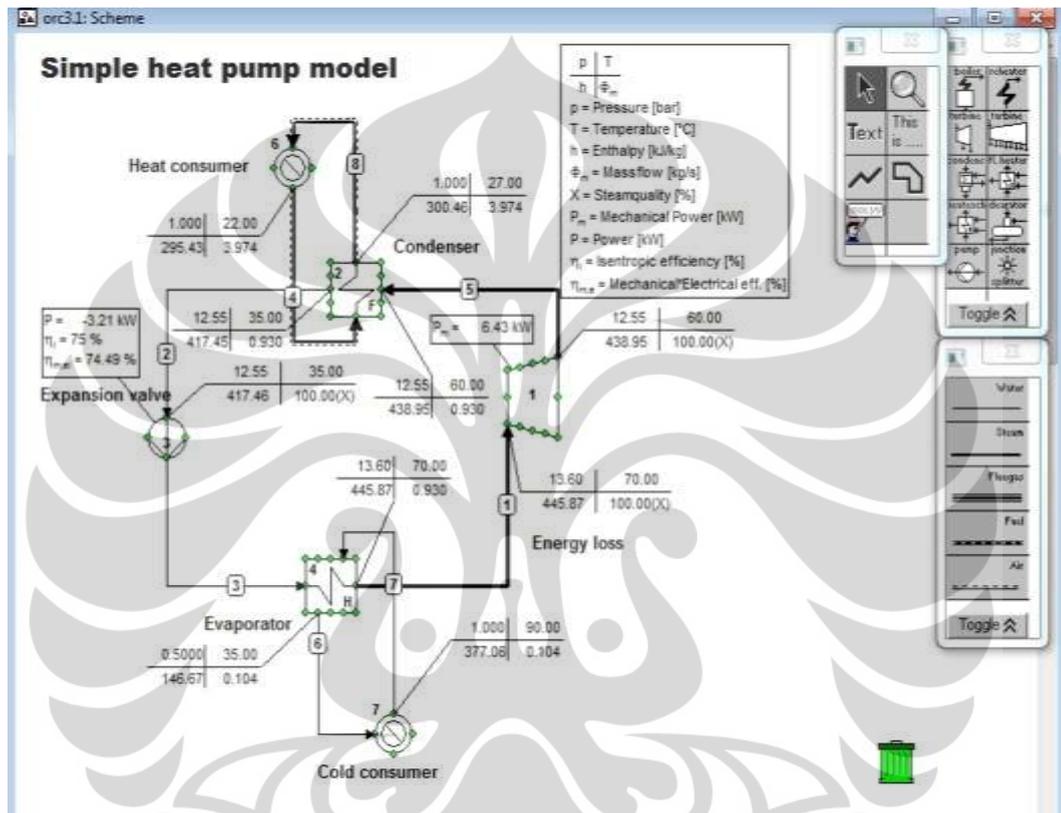


Gambar 4.15 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 60^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

6. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 70^{\circ}C$

Keadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 6,43$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13,6$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 70^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

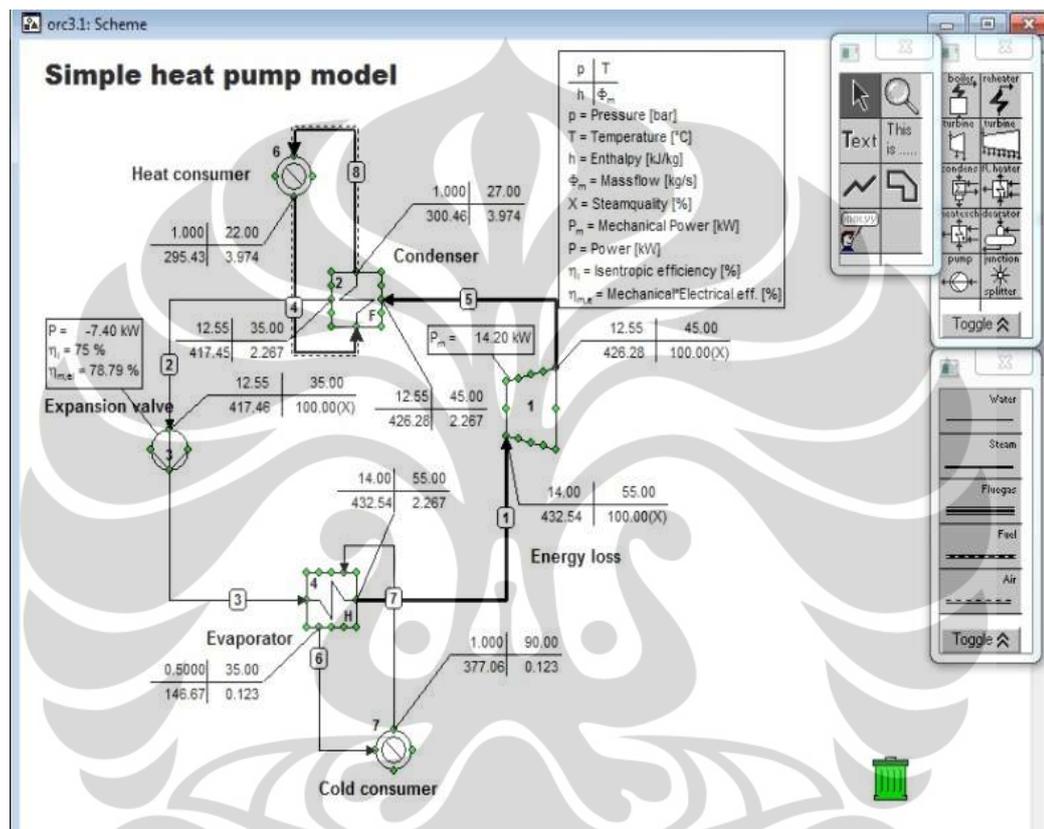


Gambar 4.16 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 70^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

7. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T_{in} = 55^{\circ}C$

Kedadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 14,20$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 14$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 55^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

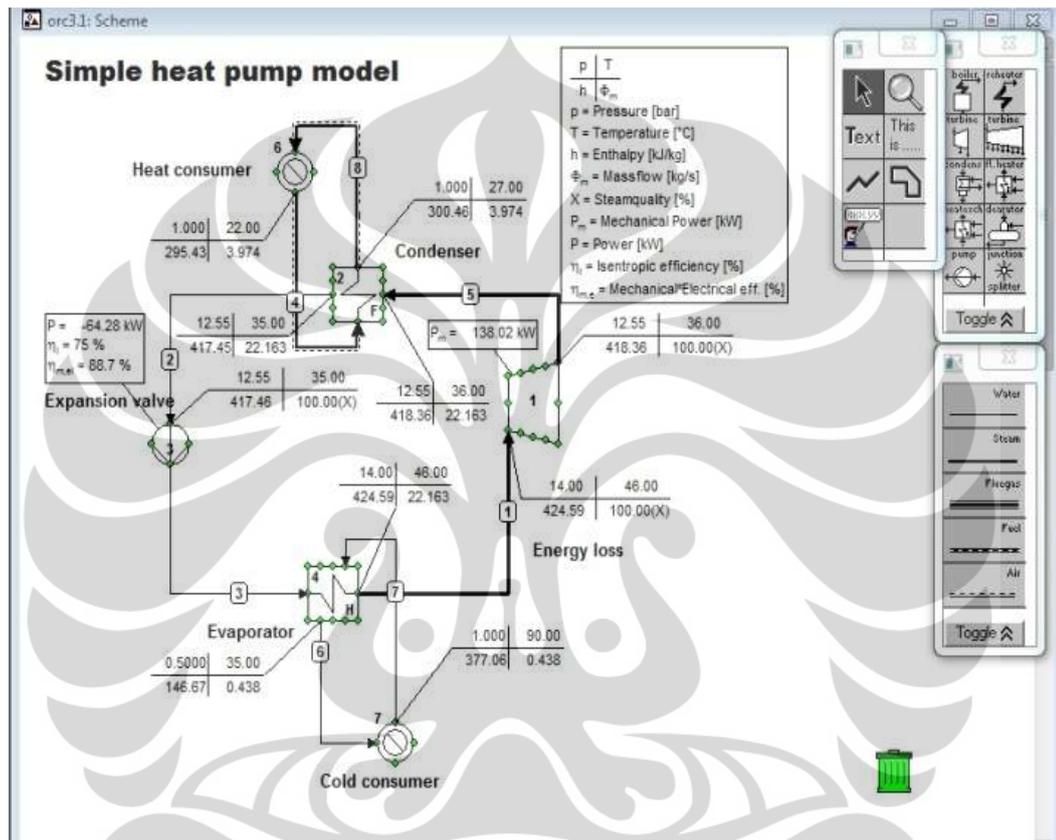


Gambar 4.17 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

8. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T_{in} = 46^{\circ}C$

Kedaaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 138,02$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 14$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 46^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

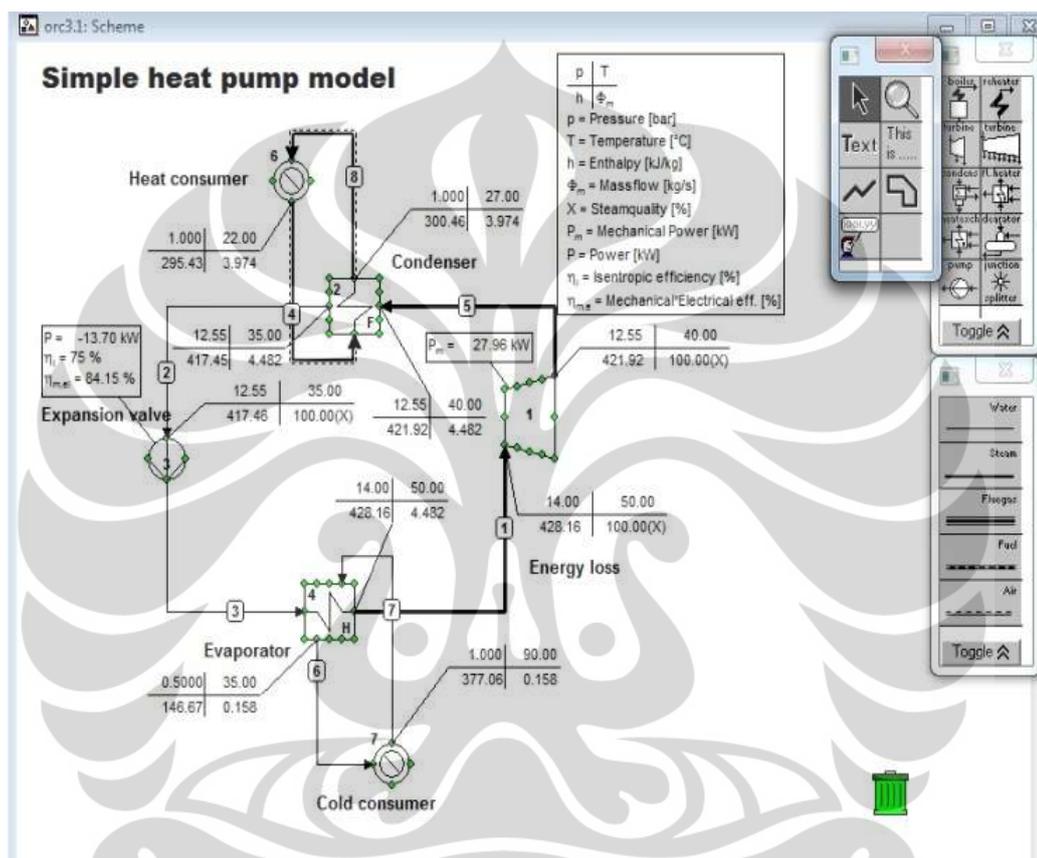


Gambar 4.18 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

9. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T_{in} = 50^{\circ}C$

Kedadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 27,96$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 14$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 50^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

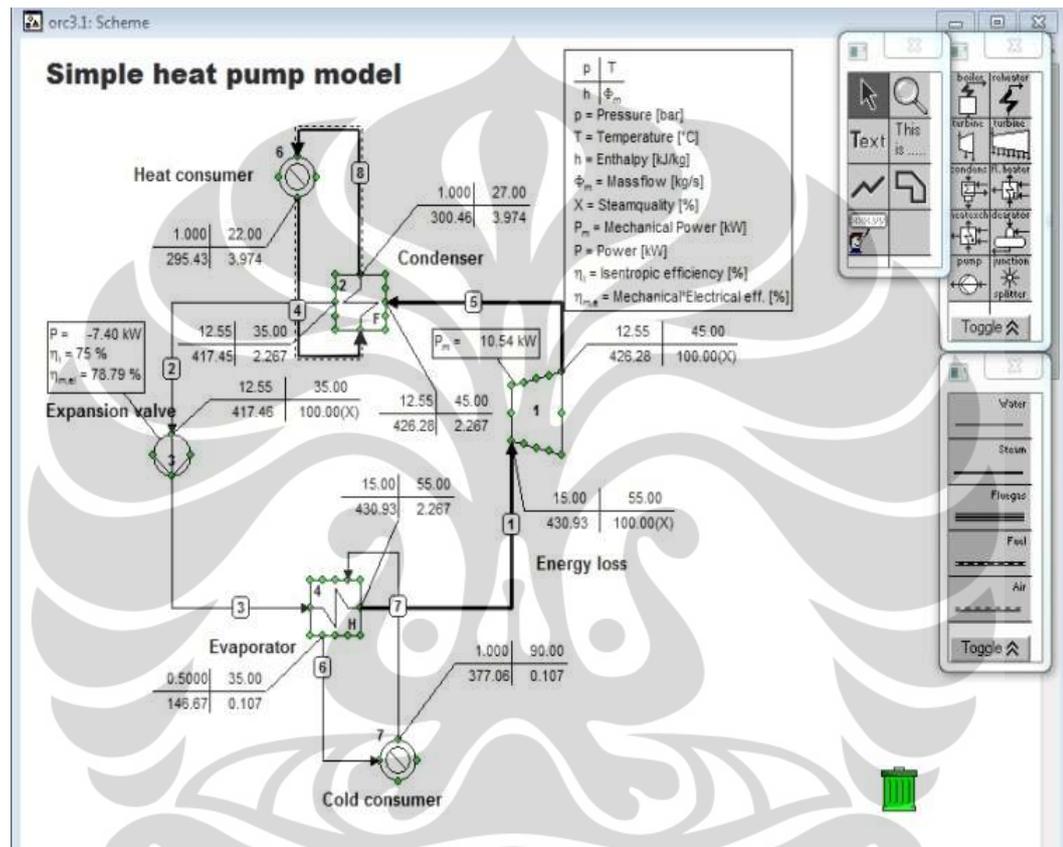


Gambar 4.19 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 14$ Bar dan $T = 50^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

10. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T_{in} = 55^{\circ}C$

Keadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 10,54$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 15$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 55^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

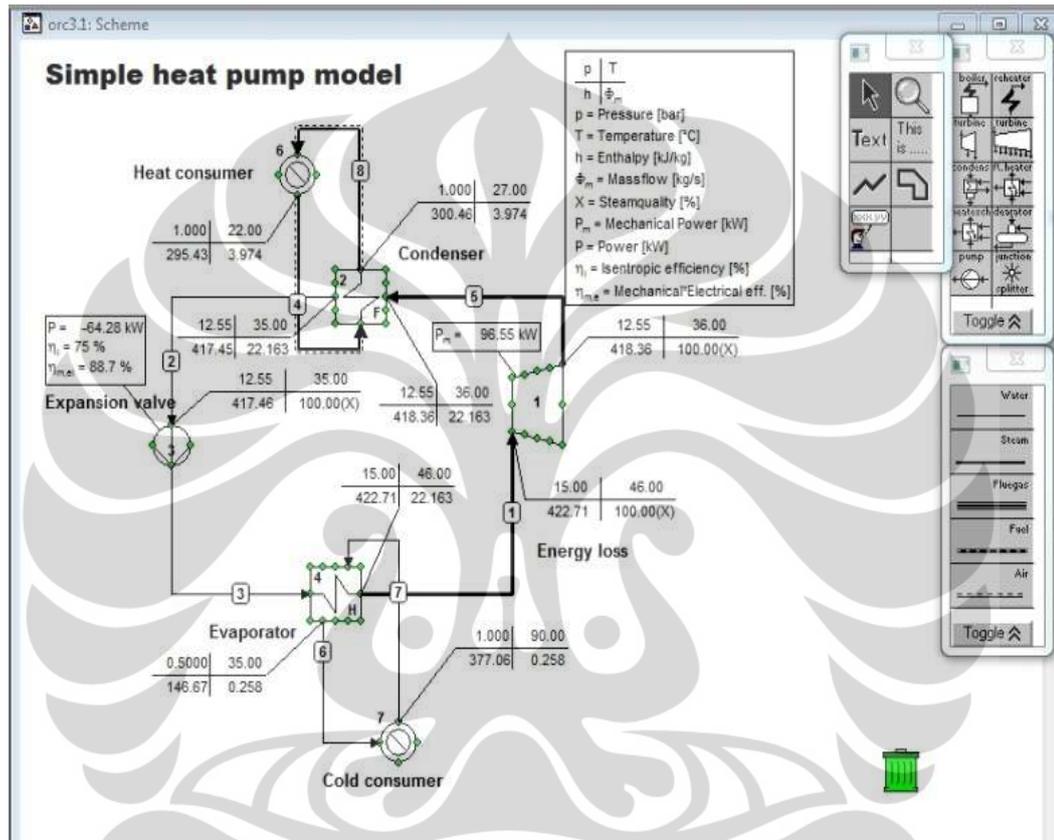


Gambar 4.20 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

11. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T_{in} = 46^\circ C$

Kedaaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 96,55$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 15$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 46^\circ C$, menggunakan fluida kerja R-22.

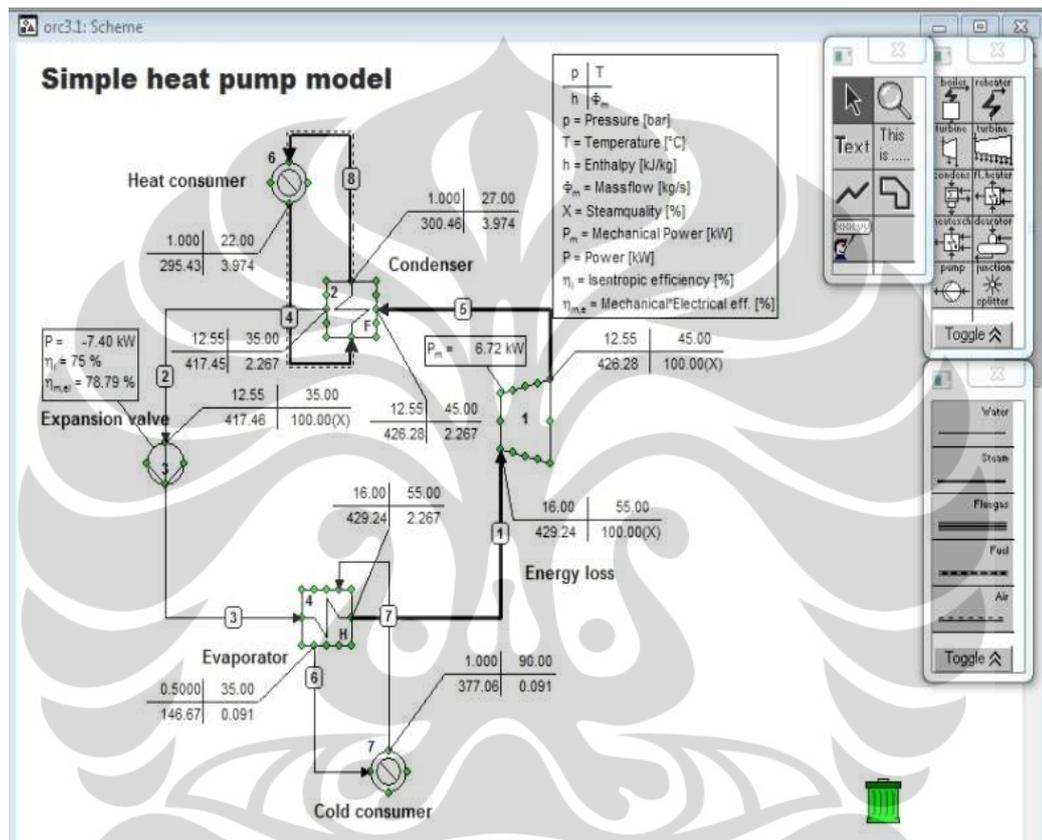


Gambar 4.21 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 15$ Bar dan $T = 46^\circ C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^\circ C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^\circ C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^\circ C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

12. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T_{in} = 55^{\circ}C$

Kedaaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 6,72$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 16$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 55^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.

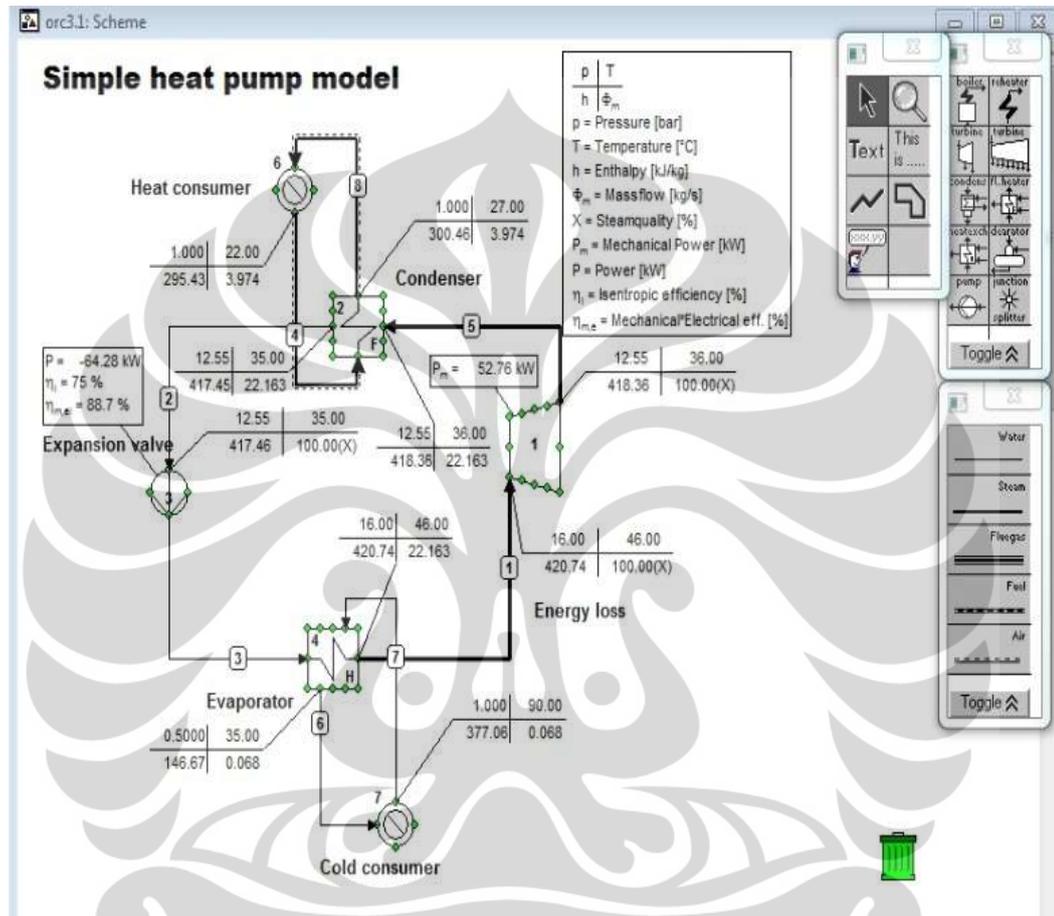


Gambar 4.22 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T = 55^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

13. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T_{in} = 46^{\circ}C$

Kadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi *cycle tempo*, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 52,76$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 16$ bar dengan temperatur *superheated* $T_{in} = 46^{\circ}C$.



Gambar 4.23 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 16$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$

Pada simulasi diatas kebutuhan selain turbin pun dapat dilihat. Masing – masing kebutuhannya yaitu kondisi pompa $P_{in} = 12,55$ bar dengan $T = 35^{\circ}C$ setelah terjadi proses kondensasi dengan temperatur masuk kondenser $T_{in} = 22^{\circ}C$, sehingga mencapai kondisi *liquid* sebelum pompa. Kondisi evaporasi dengan temperatur masuk evaporator $T_{in} = 90^{\circ}C$ untuk melakukan penukaran panas pada plate heat exchanger terhadap fluida kerja agar fluida kerja dapat berubah fase *superheated* sebelum masuk turbin.

Hasil simulasi diatas didapat dengan cara memvariasikan beberapa kondisi temperatur *superheated* dan tekanan tertentu. Hal ini dilakukan agar didapat hasil yang diinginkan. Fluida kerja yang digunakan pada simulasi *cycle tempo* diatas adalah refrijeran R-22 dengan literatur yang ada pada *software reprop*.

Tabel 4.3 Hasil simulasi *cycle tempo*

No.	Fluida Kerja	TURBIN		
		p_{in} (Bar)	T_{in} superheated ($^{\circ}C$)	$P_{mekanik}$ (KW)
1	R-22	13	46	177,50
2		13	55	17,73
3		13,6	55	15,60
4		13,6	50	31,00
5		13,6	60	10,52
6		13,6	70	6,43
7		14	55	14,20
8		14	46	138,02
9		14	50	27,96
10		15	55	10,54
11		15	46	96,55
12		16	55	6,72
13		16	46	52,76

Demikian hasil data simulasi yang didapat dari beberapa percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.3 diatas. Pada hasil percobaan diatas dilakukan dengan cara memvariasikan kondisi tekanan dan temperatur pada kondisi masuk turbin. Hal tersebut dilakukan hingga didapatnya hasil dari power *mechanic* turbin secara maksimal dengan menggunakan fluida kerja R-22 sesuai pada tekanan dan temperatur yang dibutuhkan.

Pada hasil simulasi yang didapat, fluida kerja R-22 dapat melakukan unjuk kerja pada sistem siklus rankine organik dengan baik. Dimana, hasil *power mechanic* maksimal didapat pada keadaan 177,50 KW dengan kondisi tekanan masuk turbin, $p_{in} = 13$ Bar dan kondisi temperatur *superheated*nya $T_{in} = 46^{\circ}C$. Hasil *power mechanic* yang lain juga bervariasi dengan kondisi tekanan dan temperatur *superheated* yang berbeda.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Simulasi dengan *cycle tempo* dapat menghasilkan data yang cukup untuk mengetahui kondisi aktual sistem siklus rankine organik dengan fluida kerja R-22.
2. Fluida kerja R-22 dapat menghasilkan unjuk kerja turbin yang dibutuhkan didalam sistem siklus rankine organik dengan karakteristik fluida kerja yang bekerja pada tekanan dan temperatur *superheated* yang dibutuhkan.
3. Hasil simulasi dengan fluida kerja R-22 menghasilkan kerja maksimal sebesar 177,50 KW pada tekanan masuk turbin, $p_{in} = 13$ Bar dan pada temperatur *superheatednya* $T_{in} = 46^{\circ}\text{C}$.
4. Menghasilkan kerja minimal sebesar 6,43 KW pada tekanan masuk turbin, $p_{in} = 13,6$ Bar dan pada temperatur *superheatednya* $T_{in} = 70^{\circ}\text{C}$.
5. Fungsi kerja sistem siklus rankine organik tidak dapat bekerja, apabila kebutuhan tekanan , temperatur *superheated* dan flow rate pada sistem tidak terpenuhi. Hal itu bisa terjadi yang diakibatkan karena fluida kerja tidak dapat melakukan perubahan fase disaat kondisi yang diinginkan pada tekanan dan temperatur *superheated* yang dibutuhkan.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya lebih baik pada penggunaan pompa dan turbin yang optimal dengan perhitungan-perhitungan yang lebih baik dari simulasi *cycle tempo*. Kemudian mencoba memodifikasi siklus dengan yang terbaru untuk mengoptimalkannya agar mendapatkan hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- ASHRAE Handbook. 2006. *Refrigeration System and Applications (SI)*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer. Atlanta. Georgia
- Kharagpur. *Refrigeration and Air Conditioning*. EE IIT. India. 2008
- Cengel, Y. A.(2003) *Heat Transfer: A Practical Approach* (2nd ed). United States of America : McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (2nd ed.). United States of America: McGraw-Hill.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). United States of America: John Wiley & Sons.
- Z.Q. Wang, N.J. Zhou, J.Guo, X.Y. Wang. 2012. *Fluid Selection And Parametric Optimization Of Organic Rankine Cycle Using Low Temperature Waste Heat*. International Journal Of Energy Research. Energy 40 (2012) 107-115
- Koai, Keith., Lior, Noam., Yeh, Hsuan. 1984. *Performance Analysis Of A Solar-Powered/Fuel-Assisted Rankine Cycle With A Novel 30 hp Turbine*. International Journal Of Energy Research. Solar Energy. pp. 753-764