



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC) DENGAN
*TURBOCHARGER***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**REGIE POULANKA TRESNA PUTERA
0906605095**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)* DENGAN *TURBOCHARGER*

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 : Regie Poulanka Tresna Putera

NPM : 0906605095

Tanda Tangan :



Tanggal : 29 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Regie Poulanka Tresna Putera
NPM : 0906605095
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : *SISTEM ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)
DENGAN TURBOCHARGER*

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.



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:

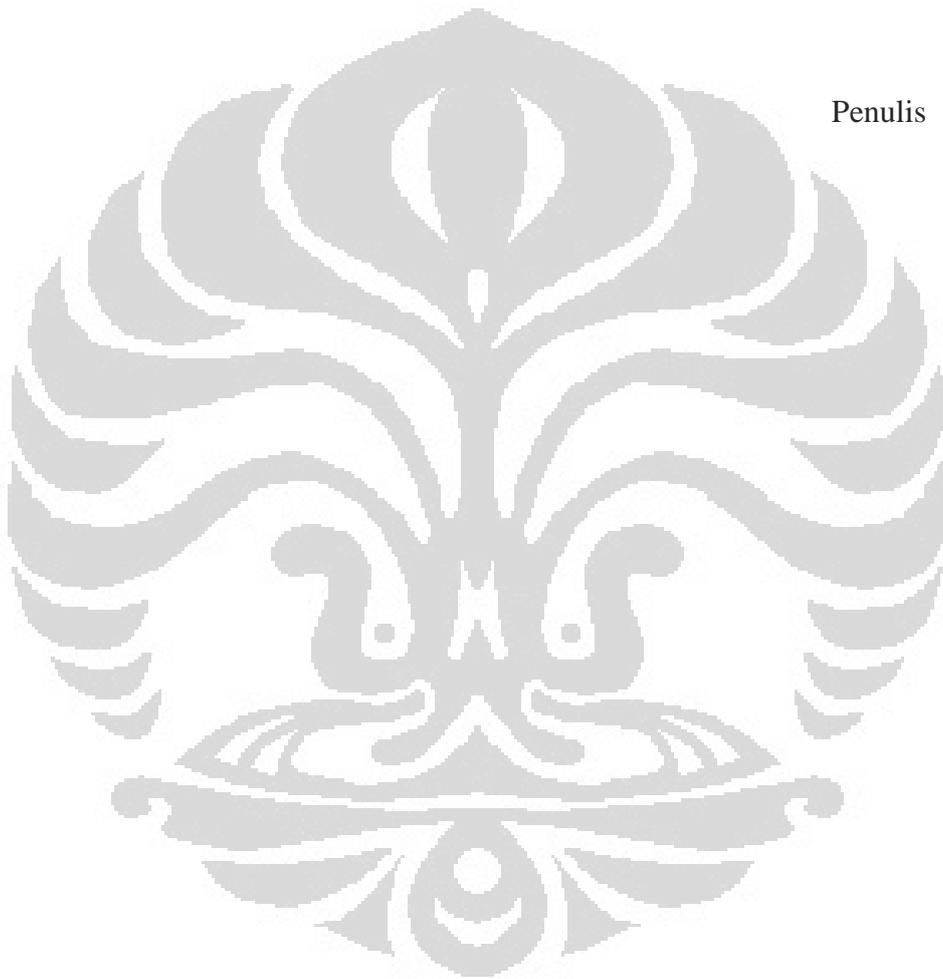
1. Kedua orang tua saya yang selalu mendukung dan mendoakan yang terbaik untuk putranya.
2. Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing tugas akhir dan pembimbing akademis yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil.
3. Seluruh dosen dan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

10. Teman-teman laboratorium Refrijerasi Tekni Mesin reguler 2008 yang selalu memberikan semangat serta masukan kepada penulis dan juga sedang berjuang dengan tugas akhirnya

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 : Regie Poulanka Tresna Putera
NPM : 0906605095
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) DENGAN
TURBOCHARGER**

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



(Regie Poulanka)

ABSTRAK

Nama : Regie Poulanka Tresna Putera
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : *SISTEM ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) DENGAN
TURBOCHARGER*

Organic Rankine Cycle atau Siklus Rankine Organik yang biasa disebut ORC merupakan modifikasi siklus rankine dengan fluida kerja dari bahan organik (Refrigeran). Refrigeran ini memiliki titik didih yang rendah, sehingga ORC dapat digunakan sebagai pembangkit listrik dari sumber panas temperatur rendah seperti gas buang dan dari geotermal yang memiliki temperatur dan tekanan yang rendah. Siklus rankine organik (ORC) digunakan untuk mengkonversikan energi panas menjadi energi listrik atau mekanis dengan temperatur rendah yang dihasilkan dari panas matahari. Fluida kerja yang digunakan yaitu refrijeran R-22. Simulasi siklus rankine organik dilakukan dengan temperatur dan tekanan tertentu dengan program cycle tempo. Dengan pemograman simulasi cycle tempo dan Refrop didapat hasil daya maksimum pada turbin dengan kondisi fluida kerja R-22 pada masukan turbin $T=46^{\circ}\text{C}$ dan tekanan=13,6 bar dapat menghasilkan daya 177,5 KW. Turbocharger adalah salah satu alternatif dalam konversi energi dari energi gerak menjadi energi listrik. Putaran turbocharger tersebut akan dimanfaatkan untuk memutar generator dan mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Tekanan yang dibutuhkan untuk menjalankan turbocharger adalah 8 psig dengan mass flow rate 25,8 kg/s.

Kata Kunci : *siklus rankine organik, konversi energi, fluida kerja, putaran, Turbocharger, Energi Listrik*

ABSTRACT

Nama : Regie Poulanka Tresna Putera
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : *ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) SYSTEM USING
TURBOCHARGER*

Organic Rankine cycle (ORC) is a modified rankine cycle with working fluids, of organic material (Refrigerant). Refrigeran pentane has low boiling point, therefore ORC can be used in power plant which uses low temperature resources, such as exhausted gases and geothermal wells. Organic Rankine Cycle (ORC) is used to convert heat energy into mechanical energy or electricity generated by a low temperature of the hot sun. The working fluid used is R-22. Simulations performed with an organic Rankine cycle temperature and pressure with cycle tempo program. By programming the simulation cycle Refrop tempo and got the result on the maximum power a turbine to the conditions of the working fluid R-22 to the input turbine $T = 460\text{C}$ and pressure = 13.6 bar can generate 177.5 KW. Turbocharger is one of the alternatives in the energy conversion of the energy of motion into electrical energy. Turbocharger rotation will be used to turn a generator and converts the energy of motion into electrical energy. Pressure required to run the turbocharger is 8 psig with mass flow rate of 25.8 kg / s.

Key word : *organic rankine cycle, energy conversion, the working fluid, rotation Turbocharger, Electrical energy*

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.....	xii
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.....	10
2.1.10 Zat Murni.....	10
2.1.11 Hukum Pertama Termodinamika.....	10
2.2. Perubahan Fase Zat Murni	11
2.2.1 Cair Tekan(compressed Liquid)	11
2.2.2 Cair Jenuh (Saturated Liquid).....	11
2.2.3 Campuran Air-Uap (Liquid Vapor Mixture).....	12
2.2.4 Uap Jenuh (Saturated Vapor)	13
2.2.5 Uap Panas Lanjut (Superheated Vapor)	13
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	14
2.4 Siklus Ideal Rankine	15
2.5 Analisis Energi Pada Sistem Pembangkit Listrik	16
2.6 Sistem Pendingin.....	19
2.7 Turbocharger	21

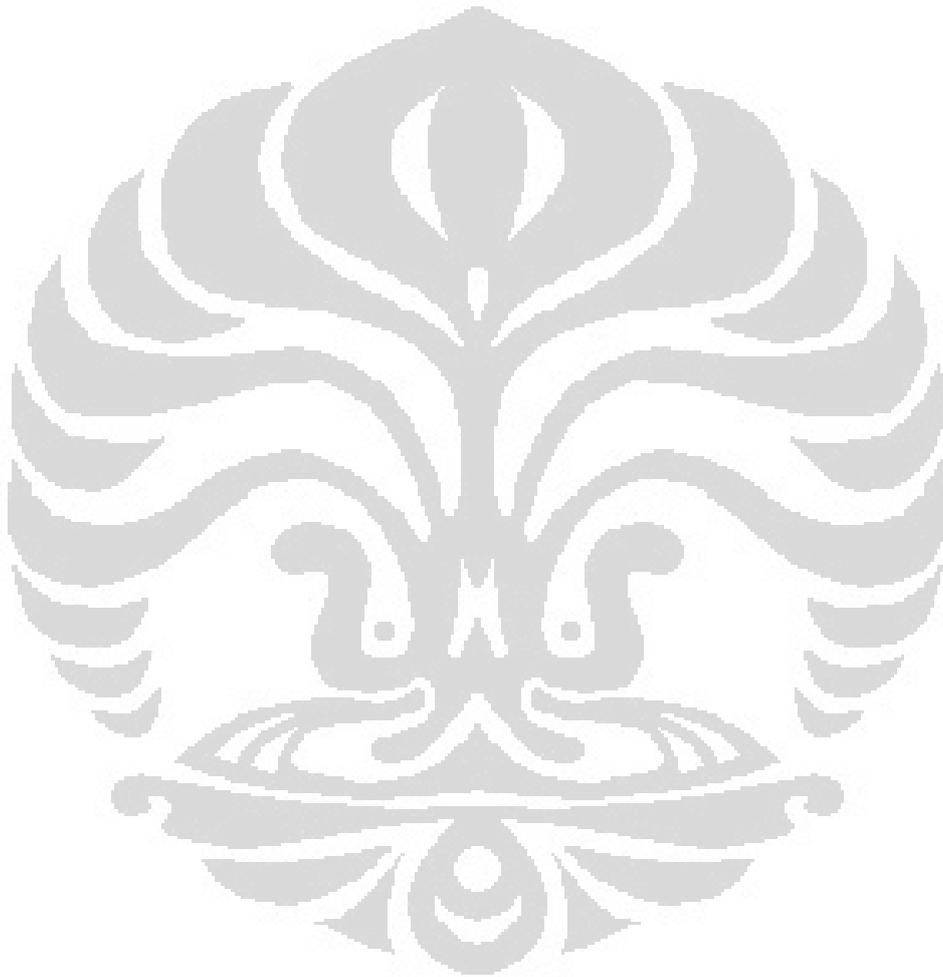
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Skema Siklus Rankine Organik	25
3.1.1 Pompa	25
3.1.2 Booster Pump	26
3.1.3 Heat Storage Tank	27
3.1.4 Plate Heat Exchanger	27
3.1.5 Filter Dryer	28
3.1.6 Shut Off Valve	28
3.1.7 Refrigerant Accumulator	29
3.1.8 Liquid Reciever	29
3.1.9 Heater	30
3.1.10 Turbin	30
3.1.11 Thermocouple	30
3.1.12 Pressure Transmitter	31
3.1.13 Motor Listrik	31
3.1.14 Automatic Voltage Regulator	32
3.1.15 Data Akuisisi (NI-DAQ)	33
3.2 Test Kebocoran	33
3.3 Tahap Pengujian dan Pengambilan Data.....	34
BAB 4 ANALISA DAN PERCOBAAN ALAT UJI.....	35
4.1 Proses Pembuatan Alat Uji	35
4.2 Hasil Percobaan Alat Uji	36
4.3 Analisa Fluida Kerja dengan sistem ORC	37
4.4 Analisa Sistem ORC dengan <i>Cycle Tempo</i>	39
4.5 Analisa <i>Turbocharger</i> dengan sistem ORC pada <i>Cycle Tempo</i>	42
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.	45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Skema Siklus Rankine	3
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	19
Gambar 2.12. Siklus Rankine ideal dan aktual	19
Gambar 2.13. Prinsip Kerja Turbocharger	22
Gambar 2.14. Letak turbocharger didalam mesin	23
Gambar 3.1. Skema Alat Uji (siklus rankine organik)	25
Gambar 3.2. Pompa Power Steering	26
Gambar 3.3. Booster pump	27
Gambar 3.4. Heat Storage Tank	27
Gambar 3.5. Plate Heat exchanger	28
Gambar 3.6. Filter Dryer	28
Gambar 3.7. Katup On/off	29
Gambar 3.8. Refrigeran Accumulator	29
Gambar 3.9. Liquid Receiver	29
Gambar 3.10. Heater	30
Gambar 3.11. Turbocharger	30
Gambar 3.12. Thermocouple	30
Gambar 3.13. Pressure Transmitter	31
Gambar 3.14. Motor Listrik	32
Gambar 3.15. Automatic Voltage regulator	32
Gambar 3.16. DAQ	33
Gambar 4.1. Karakteristik fluida kerja R-22 T=45°C	38
Gambar 4.2. Karakteristik fluida kerja R-22 T=50°C	39
Gambar 4.3. Simulasi Cycle Tempo Pin=13,6 bar dan T=46°C	40
Gambar 4.4. Simulasi Cycle Tempo Pin=13,6 bar dan T=70°C	40
Gambar 4.5. Turbocharger TD08	42
Gambar 4.6. Spesifikasi performance Turbocharger TD08	42
Gambar 4.7. Parameter dari Turbocharger TD08	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Properti Refrigeran R-22.....	20
Tabel 4.1	Tabel Percobaan Alat Uji 1.....	36
Tabel 4.1	Tabel Percobaan Alat Uji 1.....	36



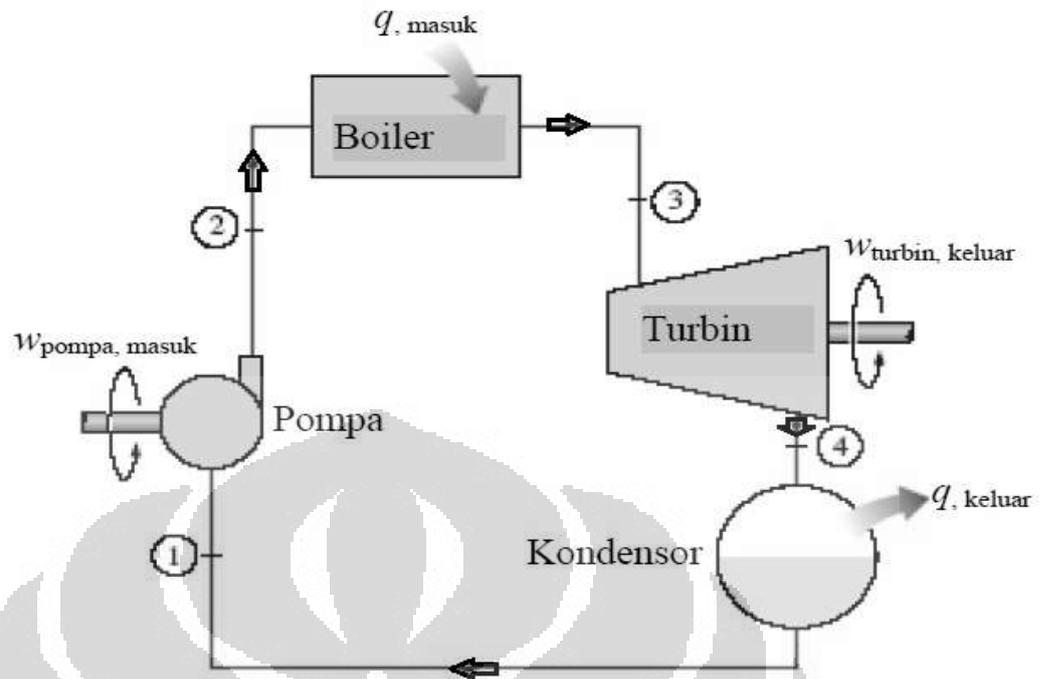
BAB 1

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 siklus rankine organik (ORC) memiliki cara kerja yang mirip dengan sebuah sistem siklus konversi energi uap konvensional. Namun, siklus rankine organik memiliki perbedaan didalam penggunaan fluida kerjanya yaitu refrijeran hidrokarbon.



Gambar 1.1 Skema siklus rankine

Siklus rankine organik (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 siklus rankine organik (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 siklus rankine organik (ORC).
2. Untuk mengetahui kondisi aktual dari sistem siklus rankine organik (ORC) sehingga dapat dibuat siklus rankine organik aktualnya.
3. Untuk mendapatkan karakteristik sistem siklus rankine organik (ORC) pada *setting point temperature boiler* dengan range temperatur $65^{\circ} - 90^{\circ} \text{C}$.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, akan dilakukan sebuah analisa karakteristik siklus rankine organik (ORC) pada *setting point temperature boiler* yang ditentukan sebesar $65-90^{\circ}\text{C}$ 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 penulisan skripsi ini dikerjakan bersama dengan rekan satu tim Readyas Wibawa maka 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 PERHITUNGAN DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

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

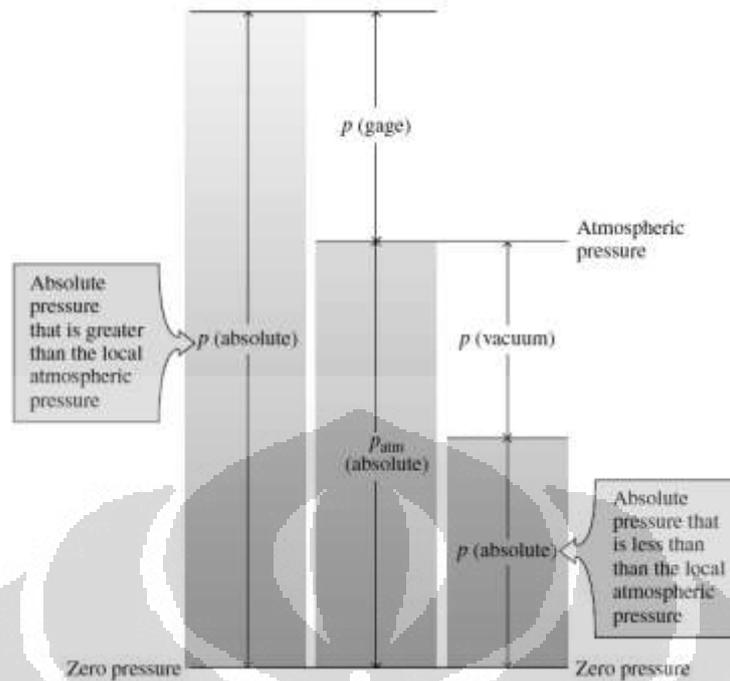
Volume spesifik adalah jumlah volume dalam satu kilogram massa suatu zat (m^3/kg) dan merupakan kebalikan dari densitas ρ dengan satuan SI yaitu kg/m^3 .

2.1.4. Tekanan

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

$$p = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

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

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

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

Tek absolut = Tek atmosfer – Tek pengukuran

$$p_{absolut} = p_{atm} - p_{gauge} \dots \dots \dots (2.3)$$

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).

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

Konversi satuan pada temperatur

$$^{\circ}\text{F} = 32 + (9/5 \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$^{\circ}\text{R} = 9/5 \cdot ^{\circ}\text{K} \dots \dots \dots (2.5)$$

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

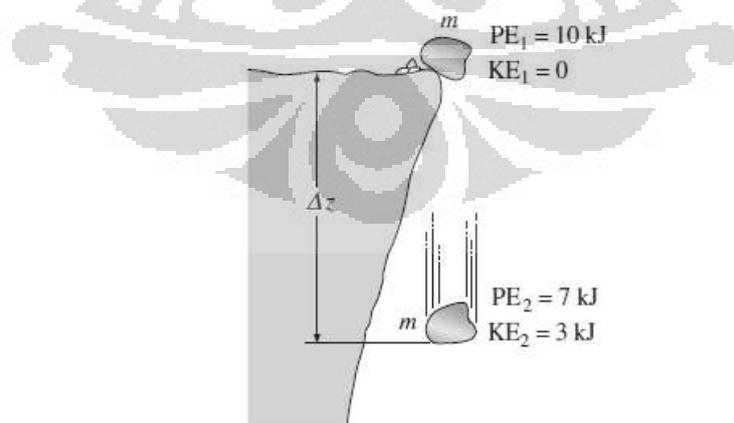
2.1.10. Zat murni

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

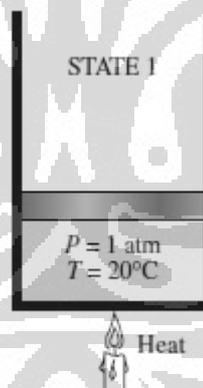
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

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.



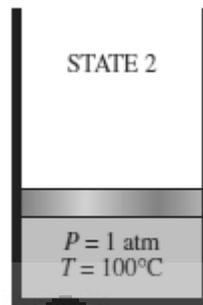
Gambar 2.4. Air pada fase cair tekan (*compressed liquid*)

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

2.2.2 Cair jenuh (*Saturation liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam 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.

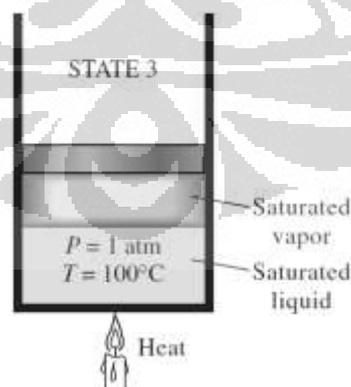


Gambar 2.5. Air pada fase cair jenuh (*saturated liquid*)

(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.

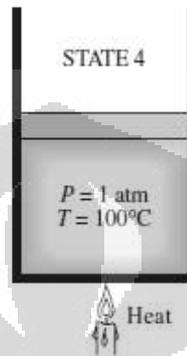


Gambar 2.6. Campuran air dan uap

(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.

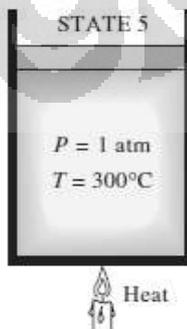


Gambar 2.7. Uap jenuh (*saturated vapor*)

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

2.2.5 Uap panas lanjut (*Superheated vapor*)

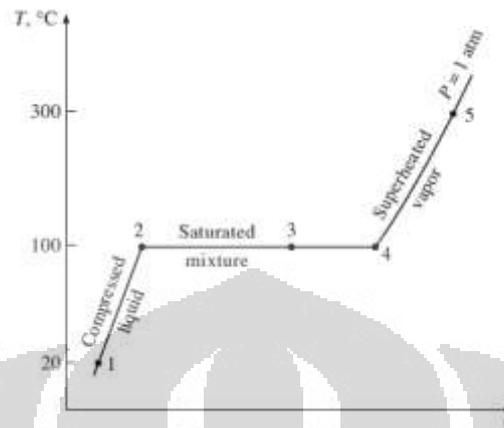
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada gambar 2.8. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder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

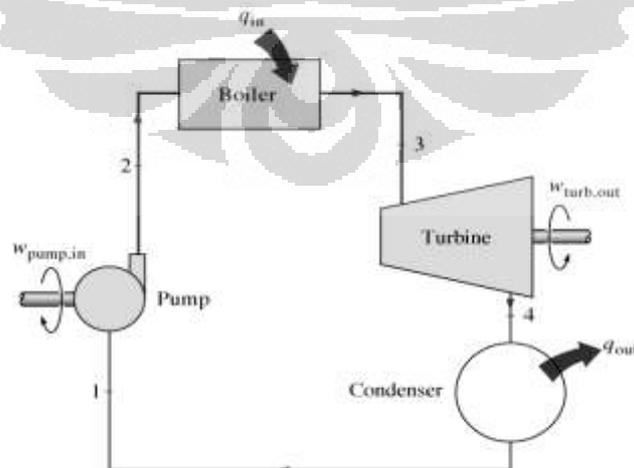


Gambar 2.9. Diagram T-v pemanasan air pada tekanan konstan

(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 dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap dapat ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.10. Skema pembangkit listrik tenaga uap

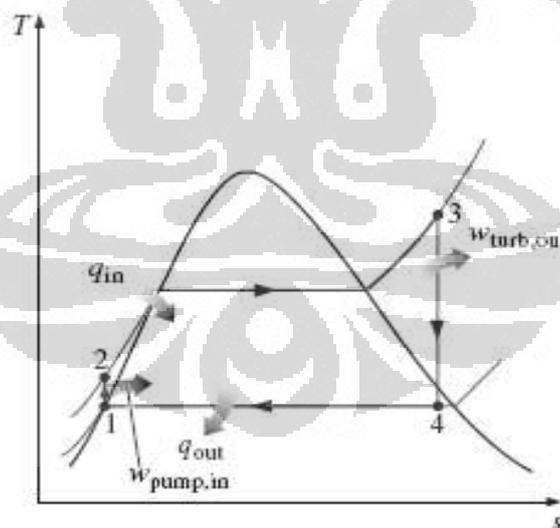
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.4 Siklus Ideal Rankine

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

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

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.

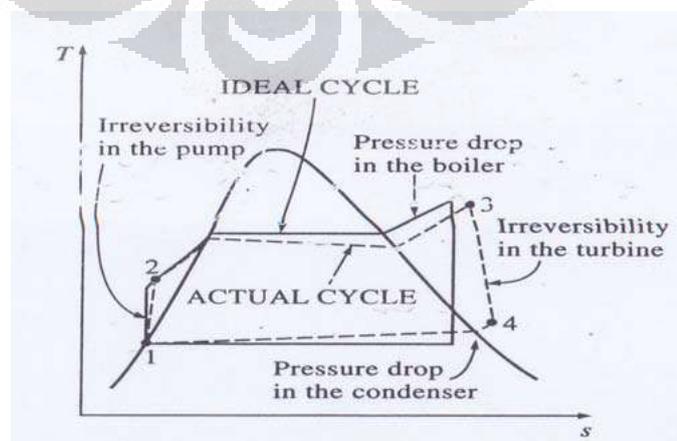
Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja yang masuk kedalam boiler yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto.

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

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

Penyimpangan pada siklus Rankine ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 2.12 siklus rankine ideal dan aktual

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:

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

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

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 (ASHRAE fundamental book)

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 (CO2 = 1)

2.7 Turbocharger

Turbocharger adalah sebuah kompresor sentrifugal yang mendapat daya dari turbin yang sumber tenaganya berasal dari asap gas buang kendaraan. Biasanya digunakan di mesin pembakaran dalam untuk meningkatkan keluaran tenaga dan efisiensi mesin dengan meningkatkan tekanan udara yang memasuki mesin. Kunci keuntungan dari turbocharger adalah mereka menawarkan sebuah peningkatan yang lumayan banyak dalam tenaga mesin hanya dengan sedikit menambah berat. *Turbocharger* ditemukan oleh seorang insinyur Swiss Alfred Büchi. Patennya untuk *turbocharger* diaplikasikan untuk dipakai tahun 1905. Lokomotif dan kapal bermesin diesel dengan turbocharger mulai terlihat tahun 1920an.

Turbocharger meningkatkan output tenaga mesin sewaktu bertahan dalam kondisi operasional yang ekstrim, *turbocharger* adalah jenis sistem induksi paksa. Mereka memampatkan udara mengalir ke dalam mesin. Keuntungan dari kompresi udara adalah bahwa hal itu memungkinkan mesin memeras lebih banyak udara ke dalam silinder, dan lebih banyak udara berarti lebih banyak bahan bakar dapat ditambahkan. Oleh karena itu, Anda mendapatkan daya yang lebih dari setiap ledakan di dalam silinder masing-masing. Sebuah mesin turbocharged menghasilkan tenaga lebih secara keseluruhan daripada motor yang sama tanpa pengisian daya. Hal ini dapat secara signifikan meningkatkan rasio power dengan berat mesin .

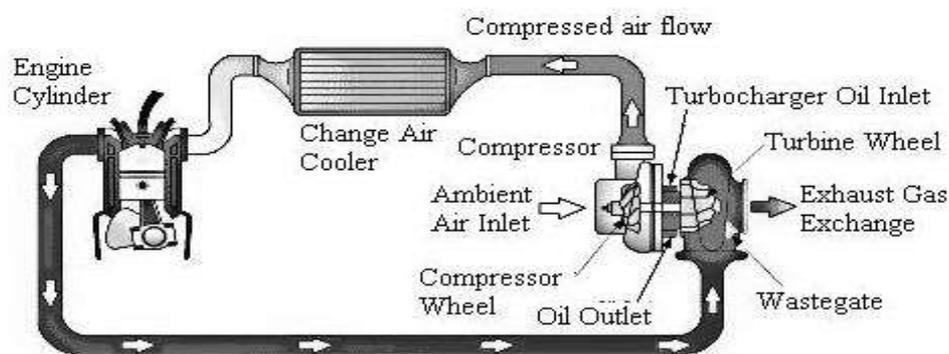
Komponen mesin ini memiliki tiga bagian penting: roda turbin, roda kompressor dan rumah as. Roda turbin yang bersudu-sudu ini berputar memanfaatkan tekanan gas buang keluar, kemudian melalui as terputarnya roda turbin ini berputar pula roda kompressor dengan sudu-sudunya sehingga memompa udara masuk dalam massa yang padat. Mengingat komponen ini sering berputar melebihi 80,000 putaran per menit maka pelumasan yang baik sangat diperlukan.

Turbocharger, atau *Turbo Supercharger*, merupakan jenis supercharger yang digerakkan oleh turbin dari sisa gas pembakaran didalam silinder. Saat ini, *turbocharger* banyak digunakan pada mesin *Diesel*. *Turbocharger* dapat menambah daya output secara signifikan, sekitar 30%, tanpa menambah berat dari mesin itu sendiri.

Turbocharger merupakan salah satu sistem induksi paksa (*force induction system*). *Turbocharger* mengkompresi udara yang mengalir kedalam silinder. Udara dikompresikan bertujuan agar kerapatan udara menjadi renggang sehingga semakin banyak udara yang dapat dimasukkan kedalam silinder. Semakin banyak udara yang masuk, maka bahan bakar yang masuk pun akan bertambah banyak. Akibatnya, daya output yang dihasilkan akan semakin besar. Mesin dengan *turbocharger* dapat menghasilkan daya output yang lebih besar dibandingkan dengan mesin tanpa *turbocharger* dengan ukuran mesin yang sama. Untuk mendapatkan udara tambahan ini,

turbocharger menggunakan gas buang hasil pembakaran dari silinder untuk menggerakkan (memutar) turbin yang dihubungkan langsung dengan poros ke kompresor (pompa udara). Sehingga apabila turbin berputar, maka kompresor akan berputar pula. Kecepatan putar turbin dapat mencapai 150.000 putaran per menit – sekitar 30 kali lebih cepat dibandingkan dengan semua putaran mesin mobil. Temperatur turbin sangat tinggi karena terletak pada saluran pembuangan gas yang bertemperatur sangat tinggi.

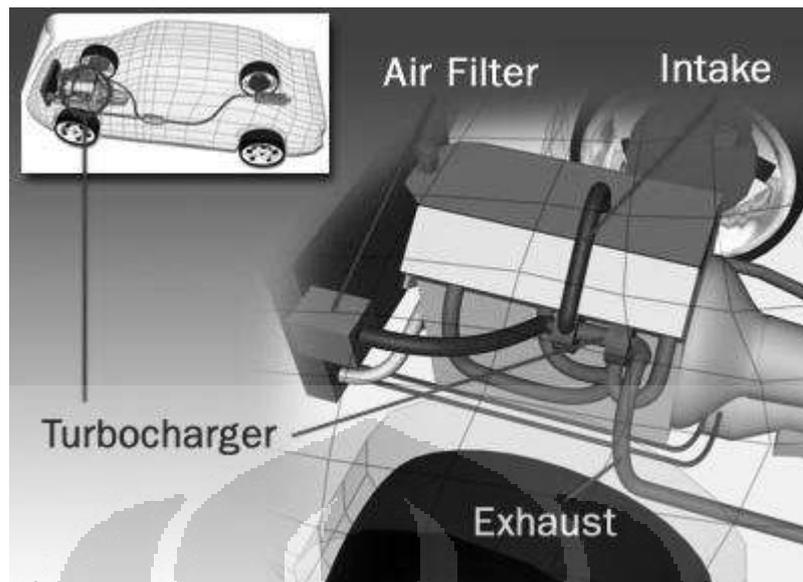
Salah satu cara untuk menambah daya mesin adalah dengan menambah jumlah udara dan bahan bakar. Antara lain dengan menambah jumlah silinder atau membuat geometri silinder menjadi lebih besar, namun terkadang cara ini tidak mungkin dilakukan. Cara lainnya adalah dengan menggunakan *turbocharger*. Cara ini lebih sederhana, desain kompak untuk mendapatkan tambahan daya mesin.



Gambar 2.13. Prinsip Kerja *Turbocharger*

Turbocharger membuat mesin dapat membakar lebih banyak udara dan bahan bakar yang dimasukkan kedalam silinder. Tekanan yang diberikan *turbocharger* mencapai 6-8 psi, karena tekanan normal atmosfer adalah 14,7 psi maka mesin mendapatkan tambahan udara sekitar 50%. Ini berarti daya mesin dapat ditambah hingga mencapai 50%. Namun, dikarenakan in-efisiensi, tambahan daya yang didapat berkisar antara 30% sampai dengan 40%.

Salah satu penyebab in-efisiensi adalah daya untuk memutar turbin tidaklah bebas. Letak turbin pada saluran pembuangan gas menambah hambatan pada saluran pembuangan. Hal ini berarti, pada langkah buang, mesin harus mendorong tekanan balik (*back-pressure*) yang sangat tinggi. Tentunya ini akan mengurangi daya dari silinder yang pada saat bersamaan melakukan pembakaran.



2.14. Gambar Letak *Turbocharger* didalam Mesin

Turbocharger diletakkan di *exhaust manifold* dari mesin. Gas buang sisa pembakaran dari silinder berfungsi untuk memutar turbin, yang bekerja seperti halnya turbin gas. Turbin tersebut dihubungkan dengan poros ke kompresor (pompa udara), yang terletak diantara saringan udara dan *intake manifold*. Kompresor berfungsi untuk menambah tekanan udara yang akan dimasukkan kedalam silinder. Gas buang dari silinder melewati sudu-sudu turbin, menyebabkan turbin berputar. Semakin banyak gas buang yang melewati sudu turbin, semakin cepat putaran turbin. Sedangkan pada ujung poros dimana turbin dipasang, kompresor memompa udara masuk kedalam silinder.

Kompresor yang digunakan merupakan tipe sentrifugal – tipe ini menghisap udara pada bagian tengah sudu dan mengalirkan udara keluar ketika berputar. Untuk mengatasi kecepatan putaran sampai dengan 150.000 putaran per menit, poros turbin harus diberi bantalan secara cermat. Kebanyakan bantalan akan rusak pada kecepatan tinggi tersebut, sehingga kebanyakan *turbocharger* menggunakan bantalan fluida. Jenis bantalan ini menopang poros pada sebuah lapisan tipis fluida yang secara konstan dialirkan ke poros. Bantalan ini mempunyai dua fungsi, mendinginkan poros dan beberapa komponen *turbocharger* lainnya serta yang terpenting adalah menyebabkan poros berputar tanpa banyak mengalami gesekan.



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 Shut Off Valve

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 *Turbocharger Mitsubishi TD08* yang fungsinya agar kita mengetahui kecepatan poros yang didapat sehingga dapat menggerakkan poros generator.



Gambar 3.11. Turbocharger

3.1.11 Thermocouple

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

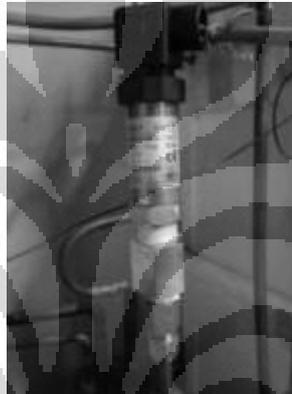


Gambar 3.12. thermocouple

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 memutar 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.

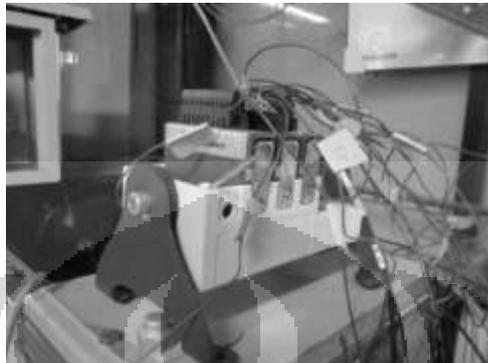
Merk : OKI
Model : AVR-500
Input : 50/60 Hz
Output : 110V/220V
Kapasitas : 500 VA



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 :

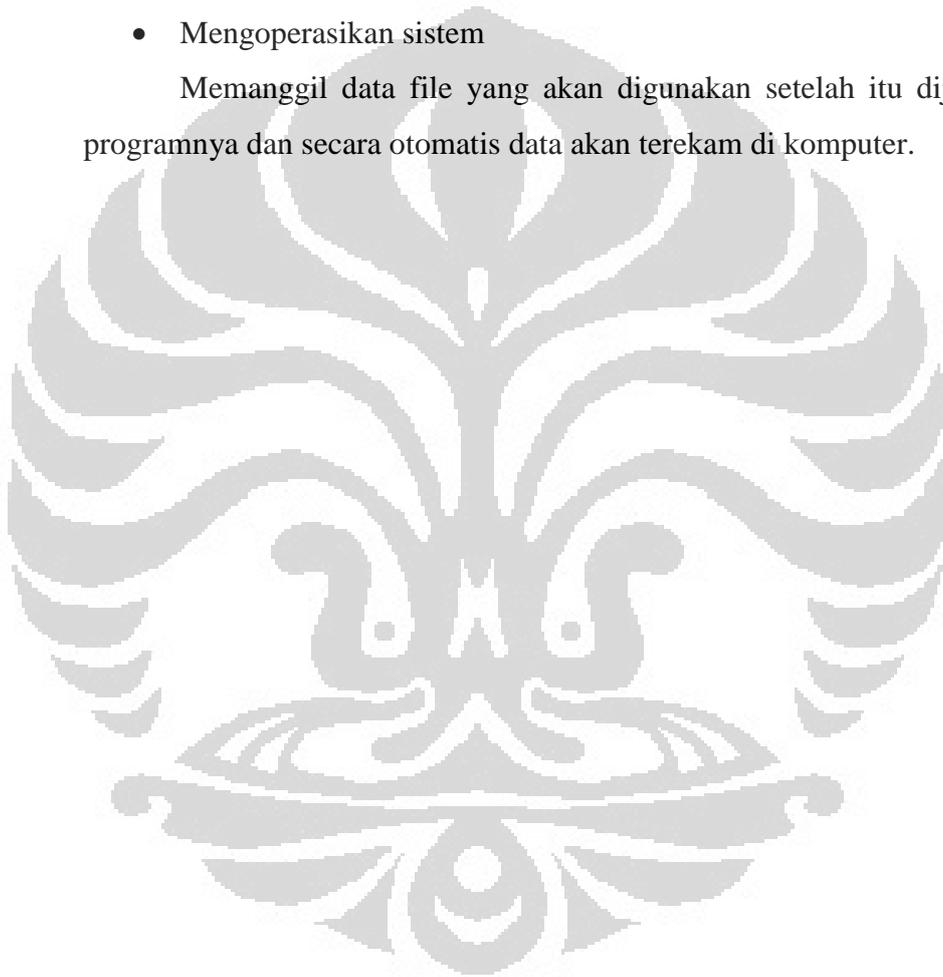
- Pastikan unit dalam keadaan off (tidak ada listrik yang mengalir)
- Sistem diisi dengan karbondioksida atau nitrogen sehingga sistem memiliki tekanan ± 8 bar
- Kebocoran terjadi apabila tekanannya menjadi turun dan dapat dilihat melalui NI Labview (DAQ) pada monitor komputer atau pressure gauge.
- 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 Pengujian dan Pengambilan data

Setelah semua proses persiapan selesai, maka pengambilan data bisa dilakukan. Adapun prosedur pengambilan data ini adalah sebagai berikut :

- Menyalakan semua kelistrikan
- Mengaktifkan NI (DAQ) untuk membaca parameter-parameter yang ingin diukur
- Mengoperasikan sistem

Memanggil data file yang akan digunakan setelah itu dijalankan programnya dan secara otomatis data akan terekam di komputer.



BAB 4

ANALISA DAN PERCOBAAN ALAT UJI

Proses analisa alat uji pada sistem *organic rankine cycle* 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 refrigerasi. Komponen yang digunakan didalam sistem siklus rankine ini terdiri dari pompa, *plate heat exchanger*, *liquid receiver*, *refrigerant accumulator*, dan *Water Tank*.

4.1 Proses Pembuatan Alat Uji

Proses pembuatan alat uji pada sistem siklus rankine organik menggunakan 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*, *filter dryer*, motor listrik, dan *automatic voltage regulator*. Pemasangan komponen-komponen tersebut dilakukan dengan beberapa langkah :

- Langkah 1 : menghitung kebutuhan pipa yang harus digunakan, serta kebutuhan *napple* dan *nut* sebagai penghubung antar komponen sebelum dilakukan pemasangan.
- Langkah 2 : pemasangan pipa sebagai penghubung antara komponen yang digunakan dengan cara menggunakan *napple* dan *nut* serta melakukan proses pengelasan dengan menggunakan las asitelin terhadap komponen yang tidak bisa dihubungkan dengan *napple* dan *nut*.

4.2 Hasil Percobaan Alat uji

Proses percobaan alat uji dilakukan beberapa kali dengan menggunakan fluida kerja refrigerant. Namun, didalam percobaan alat uji terdapat beberapa masalah yang tidak diinginkan, diantaranya :

4.1 Tabel Percobaan Alat Uji 1

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

. Permasalah-permasalahan diatas terjadi akibat pada pompa magnetic tersebut terjadi banyak kebocoran dan fungsi pompa magnetik tidak dapat berfungsi, karena daya pompa yang digunakan terlalu kecil, sehingga pompa magnetic tidak dapat berputar didalam kondisi fluida yang bertekanan. 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 pompa magnetic.

Kemudian dilakukan kembali percobaan terhadap alat uji dengan kondisi turbin screwdriver diganti oleh turbin-turbocharger dengan menggunakan fluida kerja refrigerant. Setelah dilakukan beberapa kali percobaan terdapat beberapa masalah yang timbul, diantaranya :

4.2 Tabel Percobaan Alat Uji 2

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

Permasalah-permasalahan diatas terjadi akibat fungsi turbin- screwdriver 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 screwdriver karena adanya tekanan balik.

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

4.3 Analisa Fluida Kerja Dengan 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 properti fluida kerjanya yaitu R-22. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui karakteristik dan unjuk kerja sistem *organic rankine cycle* yang dibentuk. Proses pembentukan karakteristik fluida kerja menggunakan data *Repfrop*, yaitu :

1. 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 superheatednya 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/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)
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	0.021465	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	399.92	423.68	1.7290	0.65277	0.90575	Superheated
15	45.000	15.000	61.888	0.016158	399.54	421.78	1.7177	0.66166	0.94080	Superheated
16	45.000	16.000	67.562	0.014801	399.08	419.76	1.7065	0.67161	0.98219	Superheated
17	45.000	17.000	73.609	0.013585	398.52	417.51	1.6952	0.68289	1.0321	Superheated
18	45.000	17.292	75.457	0.013253	398.04	416.95	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	1.3795	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	1109.6	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	1.3556	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 4.1 karakteristik fluida kerja R-22 $T = 45^{\circ}\text{C}$

2. 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 superheatednya 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.

	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)
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	1.0853	Superheated
20	50.000	19.427	85.952	0.011634	394.83	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

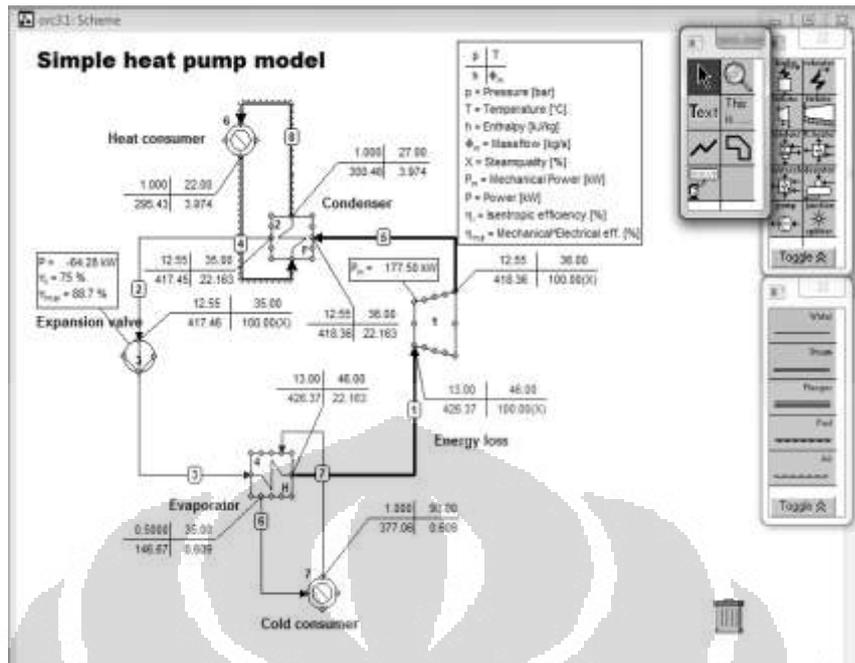
Gambar 4.2 karakteristik fluida kerja R-22 T = 50°C

4.4 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 turbin :

1. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 46^{\circ}C$

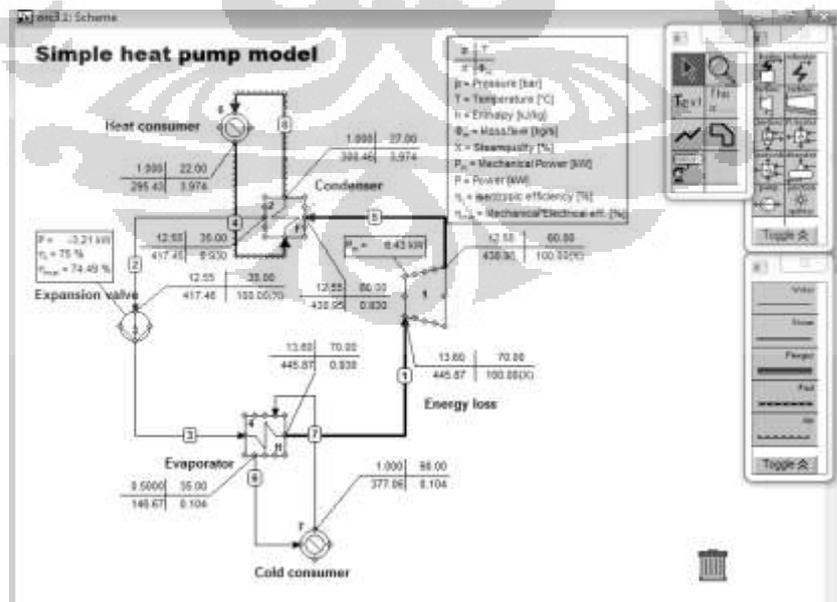
Keadaan energi mekanik pada turbin yang didapat dengan menggunakan simulasi cycle tempo, yaitu didapatkan power mekanik turbin, $P_m = 177,50$ KW. Hal ini terjadi dengan kondisi tekanan masuk turbin, $P_{in} = 13,6$ bar dengan $T_{in} = 46^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.



Gambar 4.3 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 46^{\circ}C$

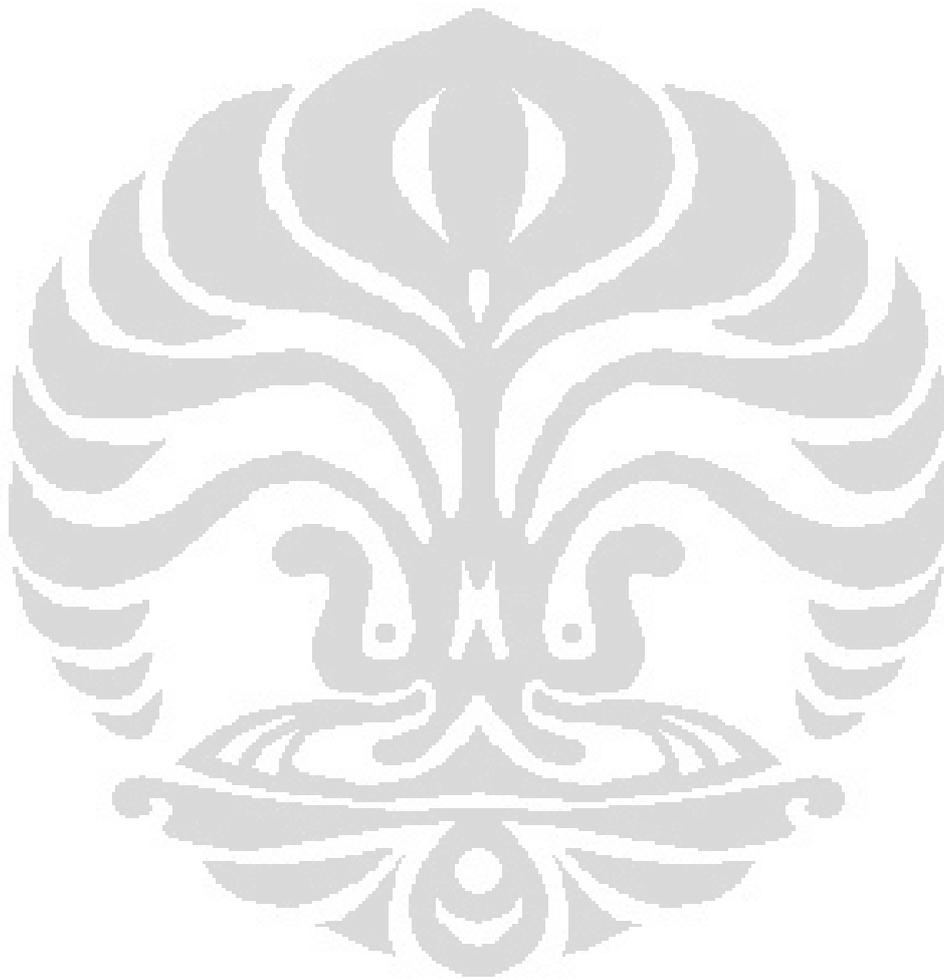
2. Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T_{in} = 70^{\circ}C$

Kedaaan 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 $T_{in} = 70^{\circ}C$, menggunakan fluida kerja R-22.



Gambar 4.4 Simulasi *cycle tempo* saat $P_{in} = 13,6$ Bar dan $T = 70^{\circ}C$

Hasil simulasi diatas didapat dengan cara memvariasikan beberapa kondisi temperatur 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*. Semakin tinggi setting point temperatur R-22 maka daya yang dihasilkan akan menurun apabila dalam keadaan tekanan yang sama.



4.5 Analisis Turbocharger dengan Sistem ORC pada Cycle Tempo

Dalam percobaan pembuatan sistem siklus Rankine ini turbin yang dimanfaatkan adalah turbin dari turbocharger. Turbocharger yang digunakan adalah Mitsubishi Turbocharger TD08 P/N 49174-10400 yang digunakan untuk kendaraan jenis truk Mitsubishi Fuso.



Gambar 4.5. Turbocharger TD08

Pada gambar dibawah ini kita dapat mengetahui secara detail tentang spesifikasi dari turbocharger tersebut.

Calculator					
Environmental Parameters		Engine Parameters			
Inlet air temperature	65	°C	Bore	118	mm
Ambient IC temperature	27	°C	Stroke	115	mm
Altitude	0	feet ASL	Cylinders	6	
Pressure	100	% SL	Displacement	7546	cc
Pressure	14.70	psi	Displacement	461	CID
Inlet air density	0.00167	lb/ft ³	Displacement	0.000636	lb/cycle
Turbo/Supercharger Characteristics		Manifold Boost			
Compressor efficiency	75	%	Manifold Boost	8	psig
Temp gain IC	62	°C	Temp out IC	127	°C
Intercooler		Pressure drop			
Intercooler efficiency	70	%	Pressure drop	0.5	psi
Temp drop IC	70	°C	Temp out IC	57	°C
Water Injection		Methanol mix			
Water injector (2)	None		Methanol mix	50	%
Water injection rate	100	cc/min	Injected water temp	21	°C
Temp drop WI	0	°C	Temp out WI	57	°C
Vaporized volume	0.0	cc	Air:Liquid Ratio	0.0	:1
Engine Variables		Air:Fuel Ratio			
RPM	6200		Air:Fuel Ratio	13.3	:1
Volumetric Efficiency	67	%	Specific Fuel Consumption	0.48	lb/HP/hr
Pressure ratio (3)	1.58		Density ratio	1.58	
CFM flow	876	ft ³ /min	HP (5)	525	HP
LBM air flow (4)	57.07	lb/min	Torque	445	ft-lb
LBM fuel flow	4.29	lb/min	BMEP	145.9	psi
Injector Sizing		Injector size (6)			
Max Injector Duty Cycle	85	%	Injector size (6)	508	cc/min

Gambar 4.6. spesifikasi performance Turbocharger TD08

Dapat diketahui parameter-parameter yang diizinkan agar turbocharger tersebut dapat bekerja, parameter-parameter tersebut dapat kita ketahui dengan

menggunakan program TurboCalculator. Dengan mengetahui terlebih dahulu spesifikasi dari mesin yang menggunakan Turbocharger TD08.

Parameters		
Flow	876	CFM
Tube Diameter	1	in
Temperature	149	°F
Mean velocity	2676.2	ft/sec
Mean velocity	815.9	meter/sec
Mach velocity	2.488	Mach
Reynolds number	1256568	
Pressure (absolute)	-306.415	kPa
Pressure (relative)	-302.4	%
Vacuum	120.406	inches Hg
Pressure Drop	59.14	psig

Gambar 4.7. Parameter dari *Turbocharger* TD08

Sesuai dari karakteristik fluida kerja yang digunakan yaitu R-22, maka fluida kerja R-22 tersebut harus berada pada kondisi temperatur 46°C dengan bertekanan 13,6 bar agar dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 117,5 KW.

Sedangkan dari program properti *refrop* yang telah disimulasikan, temperatur 46°C dengan tekanan mencapai 17 bar fluida kerja R-22 baru dapat terkondensasi dan berubah fasa uap menjadi fasa cair . seperti kita ketahui dalam siklus rankine proses yang terjadi setelah fluida kerja melewati turbin adalah turbin tersebut melakukan ekspansi yaitu tekanan aliran fluida akan menurun. Sesuai dengan program *refrop* pada kondisi masukan turbin 46°C dan tekanan 13,6 bar maka fluida kerja R-22 akan terkondensasi pada tekanan 17 bar,

Proses kerja setelah turbin adalah fluida kerja terekspansi yaitu tekanan fluida kerja akan turun. Dan tekanan setelah turbin akan berada dibawah 13,6 bar. Namun, fluida kerja R-22 tersebut tidak akan berubah fasa menjadi cair karena fluida kerja akan berubah fasa menjadi liquid pada tekanan 17 bar. Hal ini menyebabkan fungsi kerja pompa tidak akan terjadi. Karena pompa hanya dapat menghisap atau mengalirkan fluida kerja hanya dalam keadaan cair. Apabila keadaan fluida kerja sebelum pompa masih berupa gas atau uap maka pompa

tidak dapat mensirkulasikan fluida kerja didalam sistem. Akibatnya fluida kerja tertahan pada fasa gas atau uap yang menyebabkan tekanan balik ke arah turbin. Hal tersebut menyebabkan turbin yang di aplikasikan dengan *turbocharger* tidak dapat berputar dan akan terjadi kebocoran pada *turbocharger* tersebut.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Untuk menggunakan *Turbocharger* Mitsubishi TD08 diperlukan karakteristik engine penggunaannya, sehingga dapat diketahui lebih detail karakteristiknya.
2. Dengan menggunakan *Turbo Calculator software* diperlukan *Mass flow rate* sebesar 25,8 kg/s untuk *Turbocharger* Mitsubishi TD08.
3. Dengan tekanan pada sistem sebesar 8 bar *Turbocharger* tersebut belum dapat berputar, karena *mass flow rate* dari fluida kerja pada sistem tidak tercapai.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan sebelum merangkai seluruh sistem agar dapat melakukan perhitungan secara mendasar untuk keperluan dalam sistem yang akan dibuat. Pemilihan komponen berdasarkan kebutuhan yang sesuai dengan hasil perhitungan. Melakukan simulasi terlebih dahulu agar dapat sesuai dengan hasil yang diinginkan. Pemilihan Fluida kerja dapat ditentukan dengan mengetahui data properti dari fluida tersebut agar tidak salah mengaplikasikan didalam sistem.

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 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