



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA UNJUK KERJA PLTU 450 WATT DENGAN  
VARIASI TEMPERATUR *SUPERHEATER*  
(STUDI KASUS 215<sup>o</sup>C)**

**SKRIPSI**

**WAWAN MARDIYANTO**

**0806368995**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA UNJUK KERJA PLTU 450 WATT DENGAN  
VARIASI TEMPERATUR *SUPERHEATER*  
(STUDI KASUS 215<sup>o</sup>C)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**WAWAN MARDIYANTO**

**0806368995**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**KEKHUSUSAN PROGRAM PENDIDIKAN SARJANA EKSTENSI**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

Skripsi ini merupakan bagian yang dikerjakan bersama saudara **Marjo (0806368976)** dengan judul **ANALISA UNJUK KERJA PLTU 450 WATT DENGAN VARIASI TEMPERATUR SUPERHEATER (STUDI KASUS 205°C)**. Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini ada kesamaan dengan skripsi tersebut.

**Nama : Wawan Mardiyanto**

**NPM : 0806368995**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 15 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Wawan Mardiyanto  
NPM : 0806368995  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Analisa unjuk kerja PLTU 450 Watt Dengan Variasi Temperatur *Superheater* (Studi Kasus 215°C)

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr.Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA.

(  )

Sekretaris : Prof.Dr.-Ing. Nandy Setiadi Djaya Putra

(  )

Penguji : Dr.Ir. Engkos A. Kosasih, M.T.

(  )

Penguji : Dr. Agus Sunjarianto Pamitran, S.T., M.Eng

(  )

Penguji : Dr.Ir. Harun Al Rosyid, M.M., M.T.

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

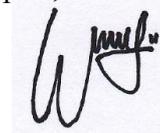
Segala puji bagi Allah SWT., atas rahmat dan izin-Nya penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi yang berjudul **Analisa Unjuk Kerja PLTU 450 Watt Dengan Variasi Temperatur Superheater (Studi Kasus 215°C)** ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan Sarjana Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.

Selama proses pengerjaan ini penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak maka, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof.Dr.Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, mengarahkan, dan memberi koreksi selama penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr.Ir. Harun Al Rosyid, M.M.,M.T. selaku pembimbing tugas akhir yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
4. Bapak Syarifudin selaku teknisi lab DTM yang telah membantu mengoperasikan PLTU.
5. Marjo rekan seperjuangan satu bimbingan skripsi yang telah sama-sama memberikan banyak kontribusi dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Teman-teman kos Armin (Afandi, Andianto, Kisna, Bowo, Andi Camalata, Igoy, Rangga, Anggit, Rio) yang telah memberikan dukungan dan semangat.
7. Teman-teman mahasiswa S1 PPSE angkatan 2008 yang telah banyak membantu dan menjadi salah satu tempat untuk bertukar informasi.

Besar harapan penulis, skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Semoga Allah SWT. memberi balasan atas bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak, amin.

Depok, 15 Juni 2011



Penulis

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

---

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

Nama : Wawan Mardiyanto  
NPM : 0806368995  
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 :

**ANALISA UNJUK KERJA PLTU 450 WATT DENGAN  
VARIASI TEMPERATUR SUPERHEATER  
(STUDI KASUS 215°C)**

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 : 15 Juni 2011

Yang menyatakan,



( Wawan Mardiyanto )

## ABSTRAK

Nama : Wawan Mardiyanto  
Program studi : Teknik mesin  
Judul : Analisa Unjuk Kerja PLTU 450 Watt Dengan Variasi Temperatur *Superheater* (Studi Kasus 215 °C)

Penelitian yang dilakukan untuk tugas akhir ini menggunakan miniatur Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ini diproduksi oleh SNM (Shin Nippon Machinery) dengan TIPE 100-SCR. PLTU ini mampu menghasilkan daya listrik sebesar 450 Watt dengan kapasitas uap maksimum 130 kg/jam.

PLTU ini sudah 10 tahun tidak beroperasi, sehingga banyak sekali masalah-masalah yang terjadi dan menyebabkan alat ini tidak dapat beroperasi dengan baik. Dengan adanya penelitian ini, maka beberapa permasalahan yang ada kemudian diselesaikan. Beberapa tindakan yang dilakukan yaitu mengganti *distributor pipe* dan kawat kasa pada *cooling tower*, memasang penutup *cooling tower*, melapisi tangki kondensat dengan cara *hot deep*, pemasangan selang dan pipa air yang menghubungkan saluran keluar pendingin bearing dengan *cooling tower*, pemasangan selang kompresor, pemasangan jalur aliran air dan uap, pemasangan kode untuk alat ukur dan *valve*.

Kerugian dalam suatu PLTU salah satunya adalah pemanfaatan energi kalor yang masih sangat kecil. Untuk mengoptimalkan kinerja dari PLTU maka dilakukan pengujian dengan cara memvariasikan temperatur yang keluar dari superheater terhadap beban listrik. Titik pengaturan temperatur *superheater* ditentukan yaitu pada 205°C dan 215°C. Hal tersebut dilakukan agar dapat diketahui karakteristik dari PLTU. Sehingga didapatkan suatu kondisi dimana pada saat beban tertentu maka kita dapat melakukan pengaturan pada temperatur keluar *superheater* sehingga kinerja PLTU secara keseluruhan menjadi optimal.

Dari dua hasil studi kasus yang telah dilakukan diperoleh bahwa energi kalor yang terbuang sangat besar bila dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh turbin, hal tersebut terlihat pada nilai efisiensi termal yang kecil pada kondisi 215°C yaitu sebesar 3,78%. Bila dibandingkan dengan kondisi superheater yang temperaturnya diatur pada 205 °C dengan nilai efisiensi termal sistem sebesar 3,88%, maka nilainya 0,1% lebih besar dari pada kondisi pada saat temperatur *superheater* diatur pada 215 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada beban yang sama yaitu 450 Watt di kedua kondisi tersebut, kenaikan temperatur dari 205°C menjadi 215°C menyebabkan menurunnya efisiensi termal dari sistem.

Analisa hasil pengujian dengan diagram fase (h-s, p-h, dan T-s) pada titik pengaturan temperatur *superheater* 215°C diketahui bahwa kerugian kalor diantaranya dari *losses* yang terjadi pada saat pendistribusian uap, kalor yang dibuang untuk menkondensasikan uap, dan kalor yang terbuang karena percampuran air dan kondensat pada tangki kondensat.

Kata kunci : PLTU, boiler, superheater, siklus rankine, efisiensi termal, turbin.

## ABSTRACT

Name : Wawan Mardiyanto  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Analytical Performance of 450 Watt Power Plant  
With Temperature Variation of Superheater  
(Case Study of 215 dgC)

The research for this thesis uses miniature Steam powerplant was produced by the SNM (Shin Nippon Machinery) with TYPE 100-SCR. This power plant capable of producing electrical power of 450 Watts with maximum steam capacity of 130 kg / hour.

This power plant was 10 years do not operate, so many problems that occur and cause the equipment is unable to operate properly. Given this research, then some existing problems and then solved. Some of the action taken is to replace the distributor pipe and wire netting on the cooling tower, install the cooling tower cover, condensate tank lining hot deep way, the installation of the hose and water pipe connecting the outlet of the bearing cooling with cooling tower, compressor hose installation, installation of flow lines water and steam, installation code for measuring devices and valves.

Losses in a power plant one of them is the utilization of heat energy that is still very small. To optimize the performance of the power plant will be tested by varying the exit temperature of the superheater to the electrical load. The point of superheater temperature setting are prescribed at 205°C and 215°C. This was done in order to know the characteristics of the powerplant. To obtain a condition where at a certain load then we can make arrangements at superheater exit temperature so that the overall power plant performance to be optimal.

From two case studies have been done show that heat is wasted energy is very large when compared with the energy generated by the turbines, it is seen on the small value of thermal efficiency that is equal to 3,78%. When compared with the condition that its superheater temperature arranged in 205°C with a value system thermal efficiency of 3,88%, the value 0,1% greater than the conditions at the time of superheater temperature is set at 215°C. This shows that at the same load of 450 Watt in both conditions, the increase of temperature from 205°C to 215°C led to decrease the thermal efficiency of the system.

The analysis of test results put emphasis on the analysis of energy and phase diagrams (*h-s*, *p-h*, dan *T-s*) at the set point temperature of superheater 215°C is known that such heat losses from the losses that occur when the distribution of steam, heat is removed to condense steam, and heat is wasted because of mixing of water and condensate in the condensate tank.

Key words : Steam powerplant, boiler, superheater, Rankine cycle, thermal efficiency, turbine.

## DAFTAR ISI

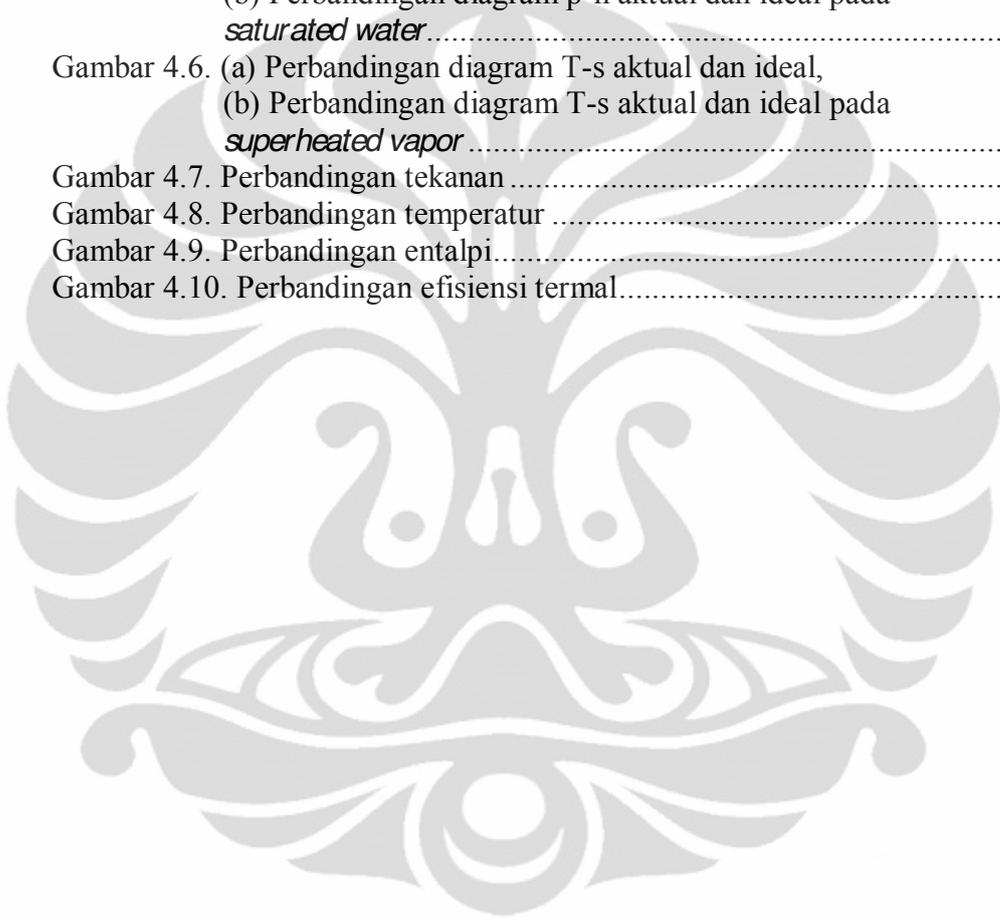
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Studi.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metodologi Studi.....	2
1.6. Sistematika Penulisan .....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Dasar termodinamika.....	4
2.1.1 Siklus termodinamika.....	4
2.1.2 Properti dan proses.....	4
2.1.3 Sifat ekstensif dan intensif.....	5
2.1.4 Volume spesifik .....	5
2.1.5 Tekanan .....	5
2.1.6 Temperatur.....	7
2.1.7 Fase.....	7
2.1.8 Sistem .....	7
2.1.9 Batas Sistem.....	8
2.1.10 Lingkungan .....	9
2.1.11 Zat murni .....	9
2.1.12 Hukum pertama termodinamika.....	9
2.2. Perubahan fase pada zat murni.....	10
2.3. Diagram untuk proses perubahan fase.....	13
2.3.1 Diagram T-v.....	14
2.3.2 Diagram P-v .....	15
2.3.3 Diagram P-T .....	15
2.4. Tabel properti.....	16
2.4.1 Entalpi .....	16
2.4.2 Keadaan cair jenuh dan uap jenuh .....	17
2.4.3 Keadaan campuran air dan uap .....	17
2.4.4 Keadaan uap panas lanjut .....	19
2.4.5 Keadaan cair tekan .....	19
2.5. Analisis energi.....	20
2.5.1 Bentuk Energi .....	20

2.5.2 Kerja aliran .....	21
2.5.3 Total energi pada fluida yang mengalir .....	22
2.5.4 Analisis energi pada sistem aliran stedi .....	22
2.6. Entropi .....	25
2.6.1 Definisi entropi .....	25
2.6.2 Penggunaan persamaan $T ds$ .....	26
2.6.3 Penggunaan diagram entropi .....	27
2.7. Pembangkit Listrik Tenaga Uap.....	29
2.8. Siklus Ideal Turbin Uap.....	30
2.9. Analisa energi pada sistem pembangkit listrik .....	32
2.10. Analisa <i>overall efficiency</i> .....	33
BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN.....	35
3.1. Miniatur PLTU.....	35
3.2. Skematik alat uji.....	35
3.3. Prinsip kerja alat uji.....	37
3.3.1 Proses Aliran Uap .....	37
3.3.2 Proses Aliran Air.....	38
3.3.3 Proses Aliran Bahan Bakar.....	40
3.4. Kondisi pengujian .....	40
3.5. Komponen alat uji .....	41
3.6. Prosedur Pengujian.....	53
3.6.1 Prosedur Persiapan.....	53
3.6.2 Prosedur Start-Up.....	54
3.6.3 Prosedur Running Dan Pengambilan Data .....	54
3.6.4 Prosedur Shut-Down .....	55
3.7. Diagram alir penelitian .....	55
BAB 4 PERHITUNGAN DAN ANALISA HASIL PEGUJIAN.....	57
4.1. Pengumpulan data .....	57
4.2. Pengolahan data .....	58
4.3. Analisa hasil pengujian.....	60
4.3.1 Analisa energi.....	60
4.3.2 Efisiensi termal.....	64
4.3.3 Analisa <i>overall efficiency</i> .....	64
4.3.4 Analisa diagram fase.....	65
4.3.5 Analisa perbandingan siklus ideal dan siklus aktual .....	83
4.3.6 Analisa perbandingan dua kondisi.....	92
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	96
5.1. Kesimpulan .....	96
5.2. Saran.....	97
DAFTAR REFERENSI .....	98
LAMPIRAN 1 .....	99
LAMPIRAN 2 .....	101
LAMPIRAN 3 .....	102
LAMPIRAN 4 .....	103

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Hubungan antara tekanan absolut, tekanan atmosfer, tekanan gauge, dan tekanan vakum.....	6
Gambar 2.2. Sistem termodinamika .....	9
Gambar 2.3. Konservasi energi .....	10
Gambar 2.4. Air pada fase cair tekan ( <i>compressed liquid</i> ) .....	11
Gambar 2.5. Air pada fase cair jenuh ( <i>saturated liquid</i> ) .....	11
Gambar 2.6. Campuran air dan uap .....	12
Gambar 2.7. Uap jenuh ( <i>saturated vapor</i> ) .....	12
Gambar 2.8. Uap panas lanjut ( <i>superheated vapor</i> ) .....	13
Gambar 2.9. Diagram T-v pemanasan air pada tekanan konstan .....	13
Gambar 2.10. Diagram T-v untuk proses perubahan fase pada beberapa variasi tekanan .....	14
Gambar 2.11. Diagram P-v .....	15
Gambar 2.12. Diagram P-T .....	16
Gambar 2.13. Contoh tabel A-4.....	17
Gambar 2.14. Kualitas uap air.....	19
Gambar 2.15. Skema untuk kerja aliran.....	22
Gambar 2.16. Massa dan energi didalam volume atur konstan pada kondisi aliran stedi .....	23
Gambar 2.17. Diagram temperatur-entropi .....	28
Gambar 2.18. Diagram entalpi-entropi .....	29
Gambar 2.19. Skema pembangkit listrik tenaga uap .....	30
Gambar 2.10. Siklus Rankine Sederhana .....	31
Gambar 3.1. Skematik Alat Uji .....	36
Gambar 3.2. Aliran air pada kondenser .....	39
Gambar 3.3. <i>Cooling tower</i> .....	39
Gambar 3.4. <i>Boiler</i> .....	41
Gambar 3.5. <i>Superheater</i> .....	42
Gambar 3.6. Turbin uap .....	43
Gambar 3.7. Generator.....	44
Gambar 3.8. Kondenser .....	45
Gambar 3.9. <i>Water softener</i> .....	47
Gambar 3.10. <i>Feed Water Tank</i> .....	47
Gambar 3.11. Pompa kondensat .....	48
Gambar 3.12. <i>Condensate Tank</i> .....	49
Gambar 3.13. Skema <i>cooling tower</i> .....	49
Gambar 3.14. (a) <i>distributor pipe</i> , (b) kawat kasa, (c) <i>induced draft fan</i> .....	49
Gambar 3.15. <i>Cooling Tower</i> .....	50
Gambar 3.16. (a) <i>Fuel Tank</i> , (b) level bahan bakar .....	50
Gambar 3.17. <i>Feed Water Pump</i> .....	51
Gambar 3.18. <i>Circulating Water Pump</i> .....	51
Gambar 3.19. Diagram alir penelitian.....	56
Gambar 4.1.(a) Diagram h-s aktual, (b) Diagram h-s aktual pada <i>superheated vapor</i> , (c) Diagram h-s aktual pada <i>saturated water</i> .....	75

Gambar 4.2. (a) Diagram p-h aktual, (b) Diagram p-h aktual pada <i>saturated water</i> (c) Diagram p-h aktual pada <i>superheated vapor</i> .....	78
Gambar 4.3. (a) Diagram T-s aktual, (b) Diagram T-s aktual pada <i>superheated vapor</i> .....	81
Gambar 4.4. (a) Perbandingan diagram h-s aktual dan ideal, (b) Perbandingan diagram h-s aktual dan ideal pada <i>superheated vapor</i> .....	86
Gambar 4.5. (a) Perbandingan diagram p-h aktual dan ideal, (b) Perbandingan diagram p-h aktual dan ideal pada <i>saturated water</i> .....	88
Gambar 4.6. (a) Perbandingan diagram T-s aktual dan ideal, (b) Perbandingan diagram T-s aktual dan ideal pada <i>superheated vapor</i> .....	90
Gambar 4.7. Perbandingan tekanan .....	92
Gambar 4.8. Perbandingan temperatur .....	93
Gambar 4.9. Perbandingan entalpi .....	94
Gambar 4.10. Perbandingan efisiensi termal .....	95



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Simbol-simbol pengujian.....	57
Tabel 4.2 Data pengujian dengan pengaturan temperatur <i>superheater</i> 215°C.....	59
Tabel 4.3 Set point <i>superheater</i> 215 °C dengan beban 450 W.....	60



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Program Percepatan 10.000 MW merupakan salah satu tonggak penting di dalam mempersiapkan ketersediaan energi nasional di masa depan. Kebutuhan akan energi terus meningkat, hal ini disebabkan karena pertumbuhan penduduk dan industri di Indonesia yang terus berkembang mengharuskan pemerintah untuk membangun pembangkit listrik baru dengan memanfaatkan sumber daya yang ada. Salah satu pembangkit listrik yang memperoleh porsi paling besar dalam pengembangan energi listrik berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi yang terkandung dalam uap untuk memutar turbin sehingga dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik melalui generator. Uap ini dihasilkan dari proses penambahan kalor pada air yang menyebabkan terjadinya perubahan fasa, proses ini terjadi di boiler sebagai hasil pembakaran bahan bakar. Secara garis besar sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa peralatan utama diantaranya adalah boiler, turbin, generator, condenser dan pompa.

Penelitian yang dilakukan untuk tugas akhir ini menggunakan miniatur Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ini diproduksi oleh SNM (Shin Nippon Machinery) dengan TIPE 100-SCR. PLTU ini mampu menghasilkan daya listrik sebesar 450 Watt dengan kapasitas uap maksimum 130 kg/jam.

Kerugian dalam suatu PLTU salah satunya adalah pemanfaatan energi kalor yang masih sangat kecil. Untuk mengoptimalkan kinerja dari PLTU maka dilakukan pengujian dengan cara memvariasikan temperatur yang keluar dari superheater terhadap beban listrik.

Penelitian ini dilakukan oleh dua orang dengan masing-masing menganalisa karakteristik PLTU pada titik pengaturan temperatur *superheater* yang ditentukan yaitu pada 205°C dan 215°C. Pada penulisan tugas akhir ini, analisa hasil pengujian dititik beratkan pada analisa energi dan diagram fase pada titik pengaturan temperatur *superheater* 215°C. Hal tersebut dilakukan agar dapat

diketahui karakteristik dari PLTU. Sehingga didapatkan suatu kondisi dimana pada saat beban tertentu maka kita dapat melakukan pengaturan pada temperatur keluar *superheater* sehingga kinerja PLTU secara keseluruhan menjadi optimal.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dalam studi ini akan dilakukan analisa energi dan analisa pada diagram fase yang terbentuk dari hasil pengujian untuk mengetahui karakteristik dari PLTU.

## 1.3 Tujuan Studi

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk memperbaiki dan mengoperasikan kembali PLTU 450 Watt Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
2. Untuk mengetahui kondisi aktual dari PLTU 450 Watt dengan menganalisa unjuk kerja dari diagram T-s, p-h dan h-s aktual.
3. Untuk mendapatkan karakteristik PLTU pada titik pengaturan temperatur *superheater* yang ditentukan yaitu sebesar 215°C.
4. Mengetahui perbandingan antara PLTU pada titik pengaturan temperatur *superheater* 205°C dan 215°C.

## 1.4 Batasan Masalah

Pada penulisan tugas akhir ini, analisa hasil pengujian dititik beratkan pada analisa energi dan diagram fase (h-s, p-h, dan T-s) pada titik pengaturan temperatur *superheater* 215°C serta dengan beban PLTU sebesar 450 Watt.

## 1.5 Metodologi Studi

Studi dilakukan dengan membuat program untuk perhitungan data dan melakukan simulasi, yang kemudian dilanjutkan dengan evaluasi data- data dari jurnal yang telah dipublikasi, dan pembuatan perangkat pengujian.

## 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 PLTU.

## **BAB III PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN**

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 untuk selanjutnya dianalisa. Analisa yang dilakukan yaitu analisa energi dan analisa diagram fase.

## **BAB IV PENUTUP**

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

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Dasar termodinamika

##### 2.1.1. Siklus termodinamika

Moran dan Shapiro menyatakan bahwa : 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 (6).

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 suatu bahan adalah jumlah kuantitatif yang dapat diukur atau di hitung dan menginformasikan keadaan bahan tersebut. Properti ini misalnya massa, tekanan, temperatur, volume, entalpi, dan entropi.

Contoh, suatu bahan bertemperatur 50 °C. Ini menjelaskan bahwa temperaturnya 50 °C tanpa harus diketahui apakah suhu tersebut berasal dari dipanaskan atau didinginkan.

Proses adalah jalan yang dilakukan 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. Sifat ekstensif dan intensif**

Moran dan Shapiro menyatakan bahwa : sifat termodinamika terbagi menjadi dua bagian, yaitu sifat ekstensif dan sifat intensif. Sifat ekstensif yaitu jika nilai dari keseluruhan sistem merupakan penjumlahan dari nilai dari setiap bagian yang menyusun sistem tersebut, contohnya yaitu massa, volume, dan energi. Sifat ekstensif dipengaruhi oleh ukuran sistem dan dapat berubah menurut waktu. Sifat intensif tidak dapat diakumulasikan seperti pada sifat ekstensif. Nilai sifat intensif tidak dipengaruhi oleh ukuran sistem dan dapat bervariasi disetiap bagian sistem pada waktu yang berbeda. Dengan demikian maka sifat intensif merupakan fungsi posisi dan waktu sedangkan sifat ekstensif umumnya hanya merupakan fungsi waktu. Contoh dari sifat ekstensif yaitu volume spesifik, tekanan, dan temperatur (6-7).

### **2.1.4. Volume spesifik**

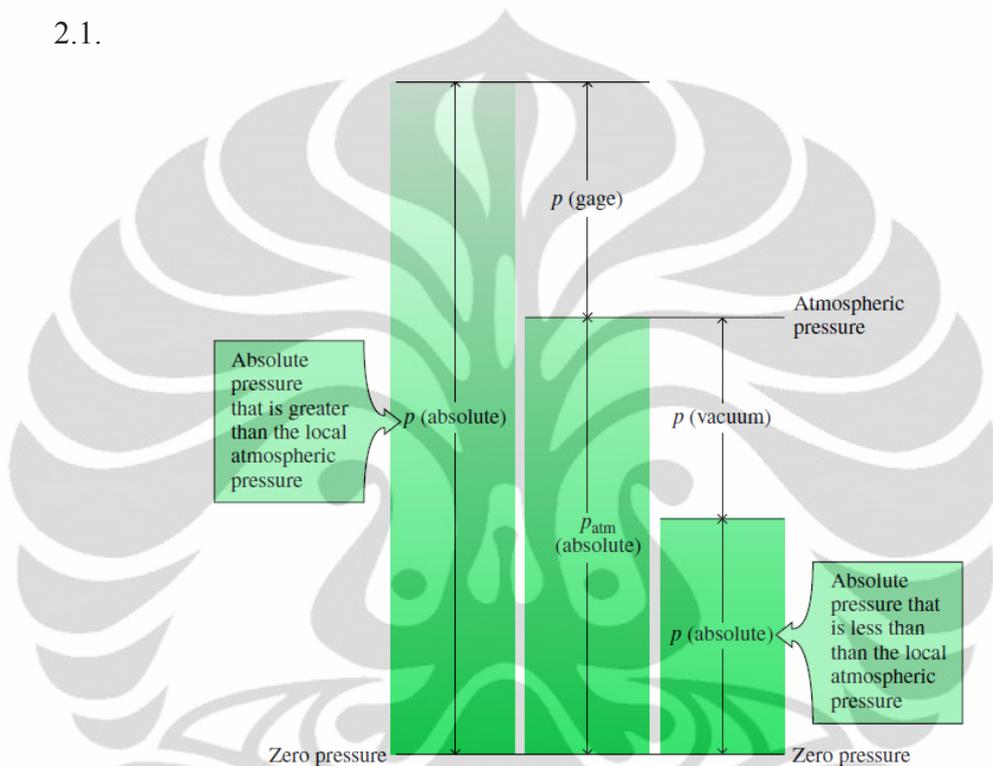
Volume spesifik ( $v$ ) adalah jumlah volume dalam satu kilogram massa suatu zat ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) dan merupakan kebalikan dari densitas  $\rho = 1/v$  dengan satuan SI yaitu  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

### **2.1.5. Tekanan**

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

$$P = \frac{F}{A} \quad \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (2.1)$$

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

$$p_{absolut} = p_{gage} + p_{atm}$$

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

Tek absolut = Tek atmosfer – Tek pengukuran

$$p_{absolut} = p_{atm} - p_{vakum}$$

### 2.1.6. 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.

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).

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273$$

Konversi satuan pada temperatur

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

$$^{\circ}\text{R} = 9/5 \cdot ^{\circ}\text{K}$$

### 2.1.7. Fase

Moran dan Shapiro menyatakan bahwa : 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 (7).

### 2.1.8. 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

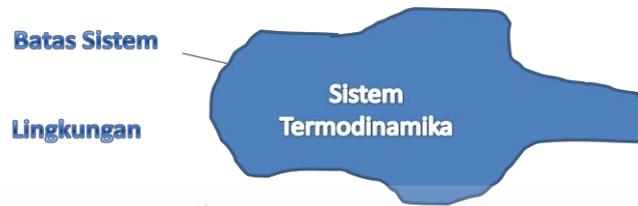
Misalnya: Tabung gas yang terisolasi.

#### **2.1.9. 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.

### 2.1.10. Lingkungan

Lingkungan adalah segala sesuatu yang berada di luar sistem.



Gambar 2.2. Sistem termodinamika

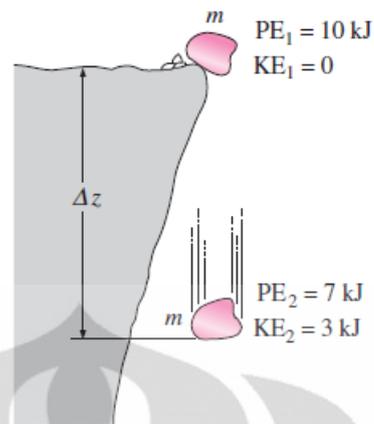
### 2.1.11. Zat murni

Moran dan Shapiro menyatakan bahwa : 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 (7).

### 2.1.12. 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  $\Delta z$  dari posisi semula maka energi potensialnya berubah menjadi 7 kJ dan sisa energinya yaitu sebesar 3 kJ berubah menjadi energi kinetik.



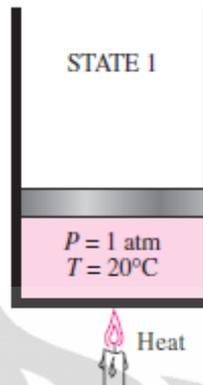
Gambar 2.3 Konservasi energi  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

## 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.

### 1. Cair tekan (*Compressed liquid*)

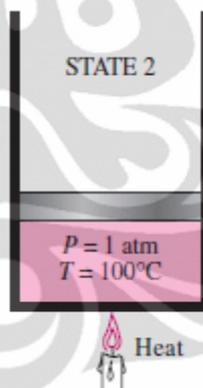
Untuk memudahkan dalam menjelaskan proses ini maka lihat pada gambar 2.4 dimana sebuah alat berupa torak dan silinder yang berisi air pada 20 °C dan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini, air berada pada fase cair tekan karena temperatur dari air tersebut masih dibawah temperatur saturasi air pada saat tekanan 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. Cair jenuh (*Saturation liquid*)

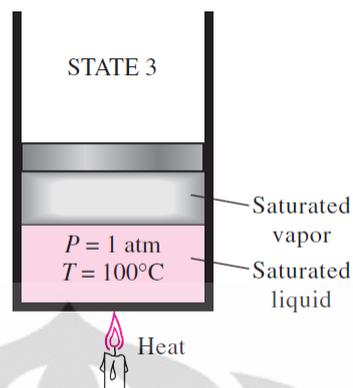
Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100 °C. Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian dari air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh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

## 3. Campuran air-uap (*liquid-vapor mixture*)

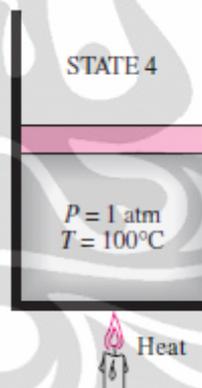
Saat pendidihan berlangsung, tidak terjadi kenaikan temperatur sampai cairan seluruhnya berubah menjadi uap. Temperatur akan tetap konstan selama proses perubahan fase jika temperatur juga dijaga konstan. Pada proses ini volume fluida didalam silinder meningkat karena perubahan fase yang terjadi, volume 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)

#### 4. Uap jenuh (*Saturated vapor*)

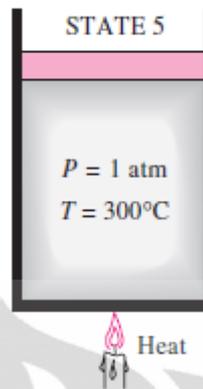
Jika kalor terus ditambahkan, maka proses penguapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi.



Gambar 2.7. Uap jenuh (*saturated vapor*)  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

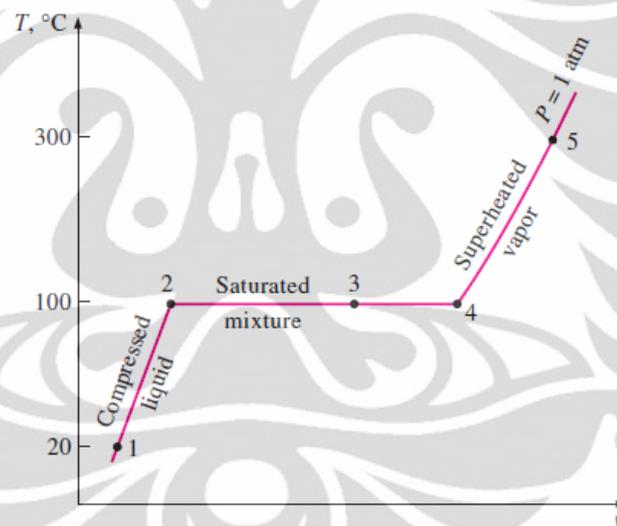
#### 5. Uap panas lanjut (*Superheated vapor*)

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  $100^\circ\text{C}$ .



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.



Gambar 2.9. Diagram T-v pemanasan air pada tekanan konstan  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

### 2.3. Diagram untuk proses perubahan fase

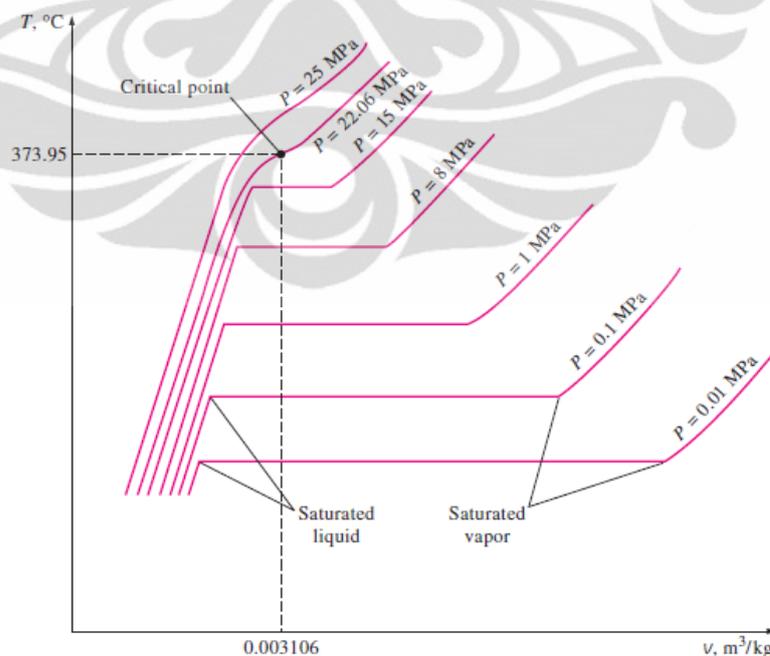
Variasi properti selama proses perubahan fase akan lebih jelas jika menggunakan diagram properti, dibawah ini ada beberapa diagram yang menjelaskan perubahan fase tersebut diantaranya diagram T-v, P-v dan P-T untuk air.

### 2.3.1. Diagram T-v

Proses perubahan fase pada air pada tekanan 1 atm telah dijelaskan sebelumnya dan digambarkan pada gambar 2.9. Selanjutnya akan dijelaskan proses tersebut tetapi pada tekanan yang berbeda.

Untuk itu maka kita harus menambah beban pada bagian atas torak sehingga tekanan pada bagian dalam silinder mencapai tekanan 1 Mpa. Pada tekanan tersebut, volume spesifiknya lebih kecil dibandingkan pada saat tekanan 1 atm. Proses perubahan fasenya sama seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 2.9 tetapi air mulai mendidih pada temperatur yang lebih tinggi yaitu 179,9 °C. Selain itu garis horizontal yang menghubungkan antara titik cair jenuh dan uap jenuh menjadi lebih pendek dibandingkan pada tekanan 1 atm.

Jika beban pada torak terus ditambahkan sehingga tekanan makin meningkat maka pada diagram tersebut akan mencapai suatu titik pada tekanan 22,06 Mpa seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. Titik ini disebut titik kritis yang didefinisikan sebagai titik dimana cair jenuh dan uap jenuh memiliki nilai yang sama. Titik ini terjadi pada temperatur 373,95 °C dengan nilai volume spesifik sebesar 0,003106 m<sup>3</sup>/kg.

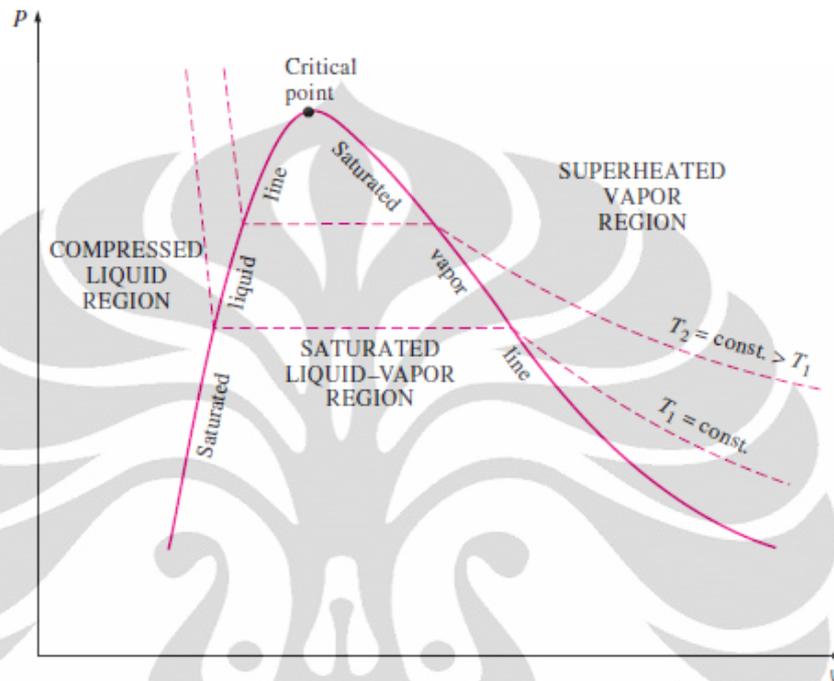


Gambar 2.10. Diagram T-v untuk proses perubahan fase pada beberapa variasi tekanan

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

### 2.3.2. Diagram P-v

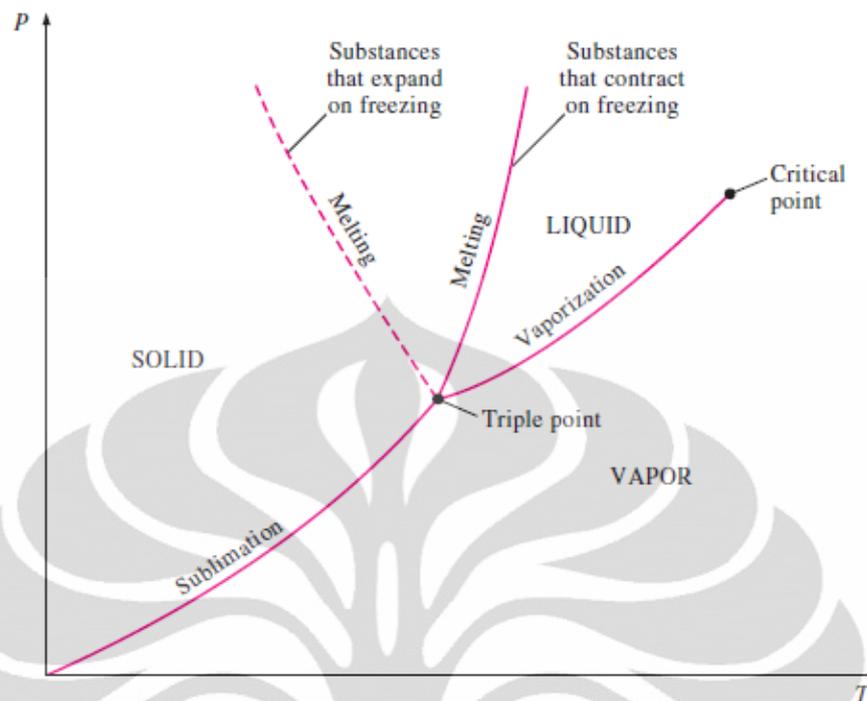
Bentuk umum dari diagram P-v pada air mirip dengan diagram T-v tetapi garis temperatur konstan memiliki kecenderungan garis menurun.



Gambar 2.11. Diagram P-v  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

### 2.3.3. Diagram P-T

Gambar 2.12 menunjukkan diagram P-T pada air. Diagram ini sering disebut dengan diagram fase dimana ketiga fase yaitu cair, padat, dan uap biasanya ada pada diagram ini dan masing masing dibatasi oleh tiga buah garis. Garis sublimasi memisahkan daerah padat dan uap, garis penguapan memisahkan daerah cair dan uap, dan garis peleburan atau pencairan memisahkan daerah padat dan cair. Ketiga garis ini bertemu pada *triple point*, dimana ketiga fase yang ada berada pada kondisi setimbang. Garis penguapan berakhir pada titik kritis karena tidak ada perbedaan yang terjadi antara cair dan uap diatas titik kritis ini.



Gambar 2.12. Diagram P-T  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

## 2.4. Tabel properti

Properti dari suatu zat biasanya ditampilkan dalam bentuk tabel. Properti termodinamika dapat diukur dengan mudah, tetapi ada yang tidak bisa langsung melainkan harus dihitung terlebih dahulu. Untuk masing-masing zat, properti termodinamika ditampilkan lebih dari satu tabel. Pemisahan tabel tersebut dipersiapkan untuk masing-masing daerah seperti *superheated vapor*, *compressed liquid* serta *saturated*.

### 2.4.1. Entalpi

Jika kita melihat tabel maka kita akan menemukan dua buah properti baru diantaranya yaitu entalpi ( $h$ ) dan entropi ( $s$ ). Entalpi merupakan properti baru yang digunakan untuk menyatakan kombinasi antara  $u + Pv$  yang dinyatakan dalam persamaan

$$h = u + Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.2)$$

atau

$$H = U + PV \quad (\text{kJ}) \quad (2.3)$$

### 2.4.2. Keadaan cair jenuh dan uap jenuh

Properti dari cair jenuh dan uap jenuh pada air dapat dilihat pada tabel lampiran 1 dan lampiran 2. Kedua tabel tersebut memberikan informasi yang sama, perbedaannya pada tabel lampiran 1 diurutkan berdasarkan temperatur sedangkan pada tabel lampiran 2 diurutkan berdasarkan tekanan. Penggunaan tabel lampiran 1 ditunjukkan pada gambar 2.13.

*Subscript f* digunakan untuk properti pada cair jenuh dan *subscript g* digunakan untuk properti pada uap jenuh. Sedangkan *subscript fg* digunakan untuk menyatakan selisih antara cair jenuh dan uap jenuh.

$v_f$  = volume spesifik pada cair jenuh

$v_g$  = volume spesifik pada uap jenuh

$v_{fg}$  = selisih antara  $v_g$  dan  $v_f$  ( $v_{fg} = v_g - v_f$ )

Temp. °C $T$	Sat. press. kPa $P_{sat}$	Specific volume m <sup>3</sup> /kg	
		Sat. liquid $v_f$	Sat. vapor $v_g$
85	57.868	0.001032	2.8261
90	70.183	0.001036	2.3593
95	84.609	0.001040	1.9808

Gambar 2.13. Contoh tabel A-4  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

### 2.4.3. Keadaan campuran air dan uap

Selama proses penguapan, air terdiri dari dua bagian yaitu cair dan uap yang disebut dengan campuran. Untuk menganalisa campuran ini maka kita harus mengetahui perbandingan antara massa air dan massa uap yang disebut dengan kualitas ( $x$ ) yang dinyatakan dalam persamaan

$$x = \frac{m_{uap}}{m} \quad (2.4)$$

dimana

$$m = m_{cair} + m_{uap} = m_f + m_g \quad (2.5)$$

Kualitas memiliki nilai dari nol sampai dengan satu, pada keadaan cair jenuh  $x = 0$  dan pada keadaan uap jenuh  $x = 1$ . Meskipun didefinisikan sebagai nilai perbandingan, kualitas sering kali diberikan dalam bentuk persentase.

Untuk menghitung nilai  $x$  dapat juga dilakukan dengan menggunakan perbandingan dari volume dari campuran. Volume total campuran adalah jumlah volume fase cair dan uap.

$$V = V_{cair} + V_{uap} \quad (2.6)$$

Jika dibagi dengan massa total campuran  $m$  maka diperoleh volume spesifik rata-rata ( $v_{avg}$ ).

$$v_{avg} = \frac{V}{m} = \frac{V_{cair}}{m} + \frac{V_{uap}}{m} \quad (2.7)$$

Karena fase cair adalah cair jenuh dan fase uap adalah uap jenuh,  $V_{cair} = m_{cair} v_f$  dan  $V_{uap} = m_{uap} v_g$  jadi,

$$v_{avg} = \left(\frac{m_{cair}}{m}\right) v_f + \left(\frac{m_{uap}}{m}\right) v_g \quad (2.8)$$

Kualitas didefinisikan sebagai,  $x = m_{uap}/m$ , dan  $m_{cair}/m = 1-x$ , sehingga apabila disubstitusikan kepersamaan diatas, akan diperoleh

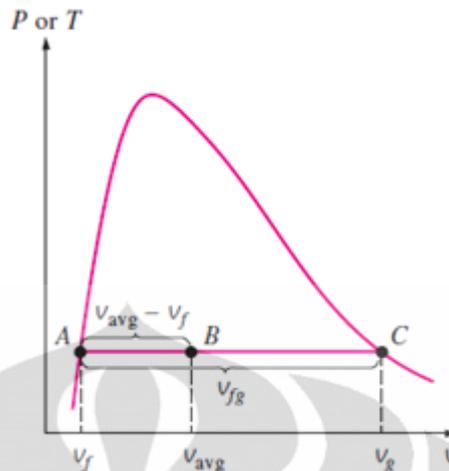
$$v_{avg} = (1-x) v_f + x v_g \quad (2.9)$$

$$v_{avg} = v_f + x (v_g - v_f) = v_f + x v_{fg} \quad (2.10)$$

dan didapatkan persamaan untuk kualitas uap,

$$x = \frac{v_{avg} - v_f}{v_{fg}} \quad (2.11)$$

Berdasarkan persamaan ini, kualitas dapat dihubungkan dengan suatu garis horizontal pada diagram P-v atau T-v seperti ditunjukkan pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Kualitas uap air  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

Analisa yang telah diberikan diatas dapat digunakan untuk energi dalam ( $u$ ) dan entalpi ( $h$ ) yang akan menghasilkan persamaan dibawah ini

$$u_{avg} = u_f + x u_{fg} \quad (2.12)$$

$$h_{avg} = h_f + x h_{fg} \quad (2.13)$$

semua hasil persamaan dapat dirangkum dalam suatu persamaan umum, yaitu

$$y_{avg} = y_f + x y_{fg} \quad (2.14)$$

dimana  $y$  adalah  $v$ ,  $u$ ,  $h$ , atau  $s$

#### 2.4.4. Keadaan uap panas lanjut

Daerah ini terletak pada bagian kanan dari garis uap jenuh dan pada bagian atas temperatur titik kritis. Dengan membandingkan dengan uap jenuh maka uap panas lanjut memiliki beberapa karakteristik, diantaranya

1. Tekanan lebih rendah ( $P < P_{sat}$  pada  $T$  yang sama)
2. Temperatur lebih tinggi ( $T > T_{sat}$  pada  $P$  yang sama)
3. Volume spesifik lebih tinggi ( $v > v_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)
4. Energi dalam lebih tinggi ( $u > u_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)
5. Entalpi lebih tinggi ( $h > h_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)

#### 2.4.5. Keadaan cair tekan

Tabel cair tekan formatnya sama dengan tabel uap panas lanjut. Hanya saja pada umumnya tabel cair tekan memiliki variasi tekanan yang besar. Dengan

membandingkan dengan uap jenuh maka cair tekan memiliki beberapa karakteristik, diantaranya

1. Tekanan lebih tinggi ( $P > P_{\text{sat}}$  pada  $T$  yang sama)
2. Temperatur lebih rendah ( $T < T_{\text{sat}}$  pada  $P$  yang sama)
3. Volume spesifik lebih rendah ( $v < v_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)
4. Energi dalam lebih rendah ( $u < u_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)
5. Entalpi lebih rendah ( $h < h_g$  pada  $P$  atau  $T$  yang sama)

## 2.5. Analisis energi

### 2.5.1. Bentuk Energi

Energi dapat terdiri dari berbagai bentuk seperti termal, mekanik, kinetik, potensial, listrik, magnetik, kimia, dan nuklir yang keseluruhannya merupakan energi total  $E$  dari sistem. Total energi dari sistem dalam unit massa dinotasikan dengan  $e$  dan dinyatakan sebagai

$$e = \frac{E}{m} \quad \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (2.15)$$

Didalam analisa termodinamika, total energi dari sistem dibagi menjadi dua bagian yaitu makroskopik dan mikroskopik. Bentuk energi makroskopik berhubungan dengan gerakan dan pengaruh dari luar seperti energi potensial dan energi kinetik. Sedangkan bentuk energi mikroskopik merupakan energi yang berhubungan dengan struktur molekul dari sistem dan tingkat aktivitas molekul serta tidak ada terpengaruh dari luar. Jumlah dari keseluruhan bentuk energi mikroskopik disebut dengan energi dalam dari sistem dan disimbolkan dengan  $U$ .

Energi kinetik merupakan bentuk energi makroskopik yang berhubungan dengan gerakan dan disimbolkan dengan  $EK$ . Ketika seluruh bagian dari suatu sistem bergerak dengan kecepatan yang sama, energi kinetik dinyatakan sebagai,

$$EK = \frac{1}{2} m V^2 \quad (kJ) \quad (2.16)$$

atau dalam unit massa,

$$ek = \frac{1}{2} V^2 \quad (kJ/kg) \quad (2.17)$$

dimana  $V$  menyatakan kecepatan dari suatu sistem yang relatif terhadap referensi yang tetap. Sedangkan energi yang berhubungan dengan elevasi atau ketinggian disebut dengan energi potensial ( $EP$ ) yang dinyatakan sebagai,

$$EP = mgz \quad (kJ) \quad (2.18)$$

atau dalam unit massa,

$$EP = gz \quad (kJ/kg) \quad (2.19)$$

dimana  $g$  adalah percepatan gravitasi dan  $z$  adalah elevasi dari titik tengah gravitasi. Total energi dari suatu sistem terdiri dari energi kinetik, energi potensial dan energi dalam yang dinyatakan dengan,

$$E = U + EK + EP = U + \frac{1}{2}mV^2 + mgz \quad (kJ) \quad (2.20)$$

atau dalam unit massa,

$$e = u + ek + ep = u + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \quad (2.21)$$

### 2.5.2. Kerja aliran

Kerja yang diperlukan untuk mendorong suatu massa fluida untuk masuk atau keluar dalam suatu volume atur disebut kerja aliran atau energi aliran. Untuk mendapatkan hubungan pada suatu kerja aliran maka digunakan skema seperti terlihat pada gambar 2.15. Fluida mengalir dan memberikan gaya kepada torak khayalan untuk masuk kedalam volume atur. Jika tekanan fluida adalah  $P$  dan luas permukaan dari fluida adalah  $A$ , maka gaya yang diberikan oleh fluida pada torak khayalan adalah

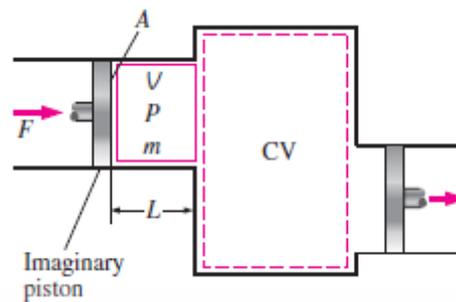
$$F = PA \quad (2.22)$$

Untuk mendorong fluida masuk kedalam volume atur, maka gaya akan menyebabkan torak khayal akan bergerak sejauh  $L$ . Jadi kerja yang dilakukan untuk mendorong fluida masuk kedalam sistem adalah

$$W_{\text{flow}} = FL = PAL = PV \quad (kJ) \quad (2.23)$$

Kerja aliran per unit massa diperoleh dengan cara membagi persamaan tersebut dengan massa dari fluida tersebut, sehingga didapatkan

$$w_{\text{flow}} = Pv \quad (kJ/kg) \quad (2.24)$$



Gambar 2.15. Skema untuk kerja aliran  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

### 2.5.3. Total energi pada fluida yang mengalir

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa total energi dari suatu sistem terdiri dari energi kinetik, energi potensial dan energi dalam yang dinyatakan dalam unit massa yaitu dengan

$$e = u + ek + ep = u + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (kJ/kg) \quad (2.25)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan untuk fluida yang tidak mengalir (*non flowing fluid*), sedangkan total energi untuk fluida yang mengalir (*flowing fluid*) yang dinotasikan dengan  $\theta$  per unit massa yaitu

$$\theta = w_{flow} + e = Pv + (u + ek + ep) \quad (2.26)$$

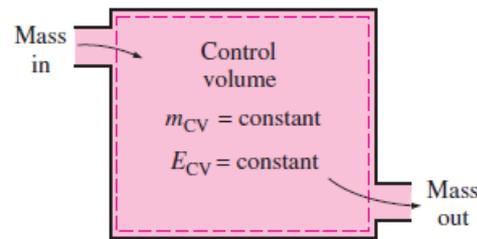
Karena  $h = Pv + u$  maka persamaannya menjadi

$$\theta = h + ek + ep = h + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (kJ/kg) \quad (2.27)$$

### 2.5.4. Analisis energi pada sistem aliran stedi

Sejumlah besar peralatan seperti turbin, kompresor dan nosel dioperasikan dalam jangka waktu yang lama dan pada kondisi yang relatif tetap. Peralatan tersebut diklasifikasikan kedalam peralatan aliran stedi yang didefinisikan sebagai proses mengalirnya suatu fluida yang melewati volume atur secara stedi.

Selama proses aliran stedi tidak ada sifat intensif atau ekstensif yang ada didalam volume atur yang berubah terhadap waktu. Jadi volume ( $V$ ), massa ( $m$ ) dan total energi ( $E$ ) pada volume atur tetap konstan.



Gambar 2.16. Massa dan energi didalam volume atur konstan pada kondisi aliran stedi

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

Sifat-sifat fluida pada bagian inlet dan outlet konstan selama proses aliran stedi. Kalor dan kerja yang berinteraksi antara sistem aliran stedi dan lingkungan sekitarnya juga tidak berubah terhadap waktu. Keseimbangan massa untuk sistem aliran stedi diberikan pada persamaan berikut,

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (kg/s) \quad (2.28)$$

Selama proses aliran stedi, total energi yang terdapat pada volume atur konstan ( $E_{cv} = \text{konstan}$ ) dan tidak ada perubahan total energi pada volume atur ( $\dot{E}_{cv} = 0$ ). Jadi jumlah energi yang masuk kedalam volume atur dalam berbagai bentuk (oleh kalor, kerja dan massa) harus sama dengan jumlah energi yang keluar. Sehingga keseimbangan energinya menjadi,

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\text{Rate of change in internal, kinetic, potential, etc., energies}} \overset{0 \text{ (steady)}}{=} 0 \quad (2.29)$$

atau

$$\underbrace{\dot{E}_{in}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{\dot{E}_{out}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} \quad (kW) \quad (2.30)$$

dan jika di jelaskan lagi energi yang ditransfer oleh kalor, kerja dan massa maka persamaannya dapat ditulis menjadi,

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}\theta = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}\theta \quad (2.31)$$

karena energi pada fluida yang mengalir per unit massa adalah  $\theta = h + \frac{1}{2}V^2 + gz$  maka,

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)$$

Jika perpindahan energi bersih melalui kalor ( $\dot{Q}$ ) dan kerja ( $\dot{W}$ ) yang melewati batas volume atur, maka persamaannya menjadi,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \quad (2.33)$$

jika perpindahan energi yang melewati volume atur yaitu yang masuk kedalam volume atur dinotasikan dengan subscript 1 dan yang keluar dari volume atur dinotasikan dengan subscript 2 maka persamaannya menjadi,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[ h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \quad (2.34)$$

jika persamaannya dibagi dengan  $m$  maka keseimbangan energi per unit massa

$$q - w = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (2.35)$$

dimana

$q$  = laju perpindahan kalor antara volume atur dan lingkungan. Jika volume kontrol kehilangan kalor maka  $q$  bernilai negatif. Jika volume atur terisolasi dengan sempurna (adiabatik) maka  $q = 0$ .

$w$  = kerja. Jika tidak ada kerja pada sistem maka  $w = 0$ .

$\Delta h = h_2 - h_1$  merupakan perubahan entalpi pada fluida dapat ditentukan dengan mudah dengan cara melihat nilai entalpi pada sisi inlet dan outlet dari tabel.

$\Delta ek = (V_2^2 - V_1^2)/2$ . Perubahan energi kinetik. Selisih kecepatan 45 m/s dapat disamakan dengan energi kinetik sebesar 1 kJ, sangat kecil bila dibandingkan dengan selisih nilai entalpi. Jadi jika energi kinetik yang memiliki selisih kecepatan yang rendah maka energi ini dapat diabaikan. Akan tetapi jika selisih kecepatannya tinggi maka akan menyebabkan kenaikan energi kinetik yang besar.

$\Delta ep = g(z_2 - z_1)$ . Perubahan energi potensial sebesar 1 kJ sama dengan perbedaan ketinggian sebesar 102 m. Perbedaan ketinggian antara sisi inlet dan outlet pada peralatan industri seperti turbin dan kompresor dibawah nilai ini, maka energi potensialnya dapat diabaikan.

## 2.6. Entropi

### 2.6.1. Definisi entropi

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi ini didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya.

Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi.

Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada setiap siklus tanpa memperhatikan dari benda mana siklus itu mendapatkan energi atau kemana siklus itu melepaskan energi melalui perpindahan kalor. Ketidaksamaan Clausius mendasari dua hal yang digunakan untuk menganalisis sistem tertutup dan volume tetap berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa:

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b = -\sigma_{siklus} \quad (2.36)$$

Dimana  $\delta Q$  mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus,  $T$  adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Subskrip  $b$  menunjukkan bahwa integral dihitung pada daerah batas sistem yang mengalami siklus. Simbol  $\oint$  menunjukkan bahwa integral dilakukan pada semua bagian dari batas tersebut dan siklus secara keseluruhan. Sedangkan  $\sigma_{siklus}$  dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai entropi yang dalam pembahasan selanjutnya menggunakan simbol  $S$ . Nilai  $\sigma_{siklus}$  positif pada saat terjadi irreversibilitas internal, nol saat tidak adanya irreversibilitas internal, dan tidak mungkin bernilai negatif.

$\sigma_{siklus} = 0$  tidak ada irreversibilitas internal dalam sistem

$\sigma_{siklus} > 0$  timbul irreversibilitas internal dalam sistem

$\sigma_{siklus} < 0$  tidak mungkin

Jadi  $\sigma_{siklus}$  merupakan ukuran dari efek yang ditimbulkan oleh irreversibilitas pada saat sistem menjalani suatu siklus. Kesamaan dan

ketidaksamaan memiliki penjabaran yang sama seperti pada pernyataan Kelvin-Plank, yaitu kesamaan muncul pada saat tidak adanya ireversibilitas internal ketika sistem mengalami siklus, sedangkan ketidaksamaan akan terjadi pada saat sistem mengalami ireversibilitas internal.

### 2.6.2. Penggunaan persamaan $T dS$

Dengan mengambil simbol  $S$  yang menunjukkan suatu sifat yang disebut entropi, maka perubahan entropi dapat dituliskan sebagai,

$$S_2 - S_1 = \left( \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev} \quad (2.37)$$

dimana subskrip “int rev” menunjukkan bahwa integrasi tersebut dilakukan untuk setiap proses reversibel internal yang menghubungkan dua keadaan. Persamaan tersebut merupakan didefinisi dari perubahan entropi. Dalam bentuk diferensial, persamaan diatas dapat dituliskan menjadi,

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev} \quad (2.38)$$

atau

$$(\delta Q)_{int rev} = T dS \quad (2.39)$$

di mana  $\delta Q$  adalah jumlah kalor yang masuk atau keluar dari sebuah sistem,  $dS$  adalah perubahan entropi sistem, dan  $T$  adalah temperaturnya.

Dari persamaan di atas, apa yang terjadi jika kita mengeluarkan kalor dari sebuah sistem, sehingga  $\delta Q < 0$ , dan menyebabkan  $dS < 0$ ?

Menanggapi pertanyaan di atas, bisa jadi kita menjawab dengan argumen berikut, perubahan entropi dalam kasus tersebut akan bernilai negatif karena kita cuma meninjau sistemnya secara parsial. Tetapi jika kita meninjau keseluruhan sistem yaitu, benda yang diambil kalornya dan benda yang menerima kalor tersebut, maka entropinya pasti bertambah atau tetap. Sebagai contoh proses pelepasan kalor oleh kondenser pada suatu sistem pembangkit listrik tenaga uap.

Dalam sebuah proses reversible, hubungan antara entropi dan kalor adalah seperti yang ditunjukkan dalam persamaan sebelumnya. Jika sebuah benda  $A$  diambil kalornya sebesar  $Q$ , maka benda  $A$  tersebut akan mengalami perubahan entropi sebesar  $-Q/T$ . Perubahan entropi bisa negatif, karena kita cuma meninjau

si benda  $A$  saja. Tetapi, misalkan kalor dari benda  $A$  ini ditampung oleh benda  $B$ , maka perubahan entropi dari si  $B$  adalah sebesar  $Q/T$ , sehingga kita simpulkan bahwa perubahan entropi total dari benda  $A+B$  adalah  $-Q/T+Q/T$ , yaitu perubahan entropi total adalah nol, atau dengan kata lain, entropi totalnya tetap.

Ini cuma berlaku jika proses perpindahan kalor antara  $A$  dan  $B$  adalah reversible. Jika  $A$  adalah air hangat dalam gelas dan  $B$  adalah gula yang dimasukkan ke dalam air tersebut, maka juga akan terjadi perpindahan kalor di antara keduanya, tetapi proses ini adalah proses yang irreversible, sehingga argumen di atas yang menyatakan bahwa perubahan entropi total adalah nol, atau dengan kata lain, entropi totalnya tetap tidak berlaku. Untuk proses irreversible, hubungan antara entropi dan kalor adalah

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev} + dS' \quad (2.40)$$

di mana  $dS'$  adalah perubahan entropi akibat keacakan dari sebuah sistem, dan nilainya selalu lebih dari nol.

Total kalor yang diterima oleh gula dan kalor yang dikeluarkan oleh air hangat, adalah nol. Tapi kita tahu bahwa perubahan entropi dalam sistem ini pasti positif, karena proses tersebut tidak bisa kita putar balik. Perubahan entropi yang positif ini murni disebabkan oleh bertambahnya derajat keacakan dari partikel-partikel air hangat dan gula ketika ada pertukaran kalor di antara keduanya. Ini mengakibatkan nilai  $dS' > 0$ , sehingga kita katakan bahwa entropi total dari sistem air gula ini bertambah.

### 2.6.3. Penggunaan diagram entropi

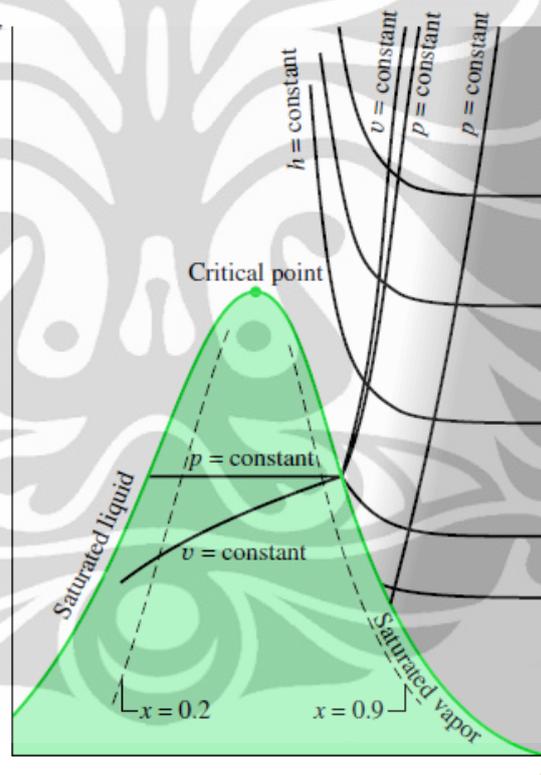
Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram ini sangat membantu untuk menentukan lokasi dan keadaan dan menggambarkan proses pada diagram dimana koordinatnya adalah nilai entropi. Diagram dengan salah satu sumbu koordinat berupa entropi yang sering digunakan adalah diagram temperatur-entropi (T-s) dan diagram entalpi-entropi (h-s).

#### 1. Diagram T-s

Bentuk umum dari diagram temperatur-entropi dapat dilihat pada gambar 2.17. Tampak bahwa garis entalpi konstan juga terdapat pada gambar ini.

Pada daerah uap panas lanjut, garis-garis volume spesifik konstan, kemiringannya lebih curam dari garis-garis tekanan konstan. Garis-garis kualitas tetap ditunjukkan dalam daerah dua fase cair-uap. Pada beberapa gambar, garis kualitas uap tetap ditandai sebagai garis-garis persen uap yang merupakan rasio massa cairan dengan massa total.

Pada daerah uap panas lanjut dalam diagram T-s, garis-garis entalpi spesifik konstan hampir membentuk garis lurus pada saat tekanan berkurang. Keadaan ini dirunjukkan pada daerah terarsir pada gambar 2.17. Untuk keadaan pada daerah ini, entalpi ditentukan hanya dengan temperatur. Variasi tekanan antara beberapa keadaan tidak berpengaruh besar.

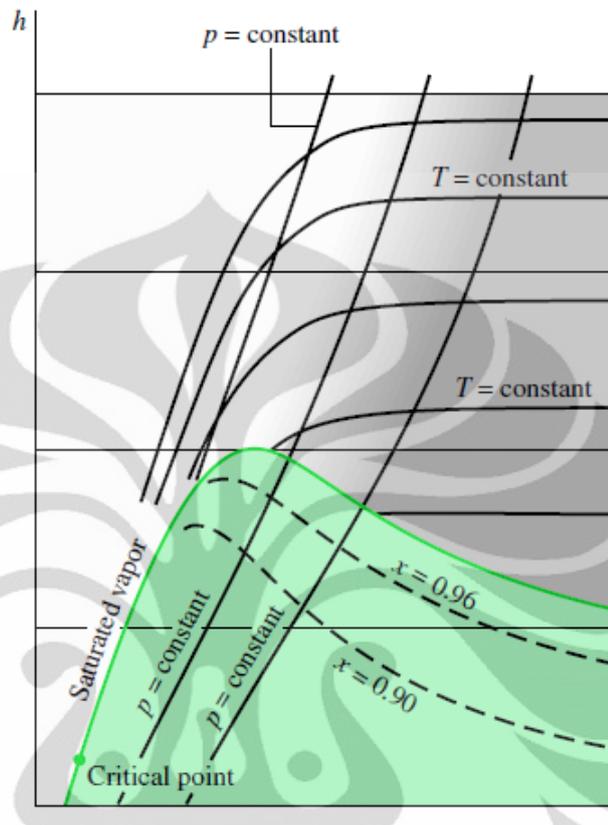


Gambar 2.17. Diagram temperatur-entalpi (Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006)

## 2. Diagram H-s

Diagram entalpi-entalpi ini disebut juga dengan diagram Mollier, seperti tampak pada gambar 2.18. Garis-garis kualitas konstan ditunjukkan pada daerah campuran dua fase cair-uap. Grafik ini digunakan untuk mendapatkan nilai sifat pada keadaan uap panas lanjut dan untuk campuran dua fase cair-uap. Data cairan umumnya jarang tersedia. Pada daerah uap panas lanjut,

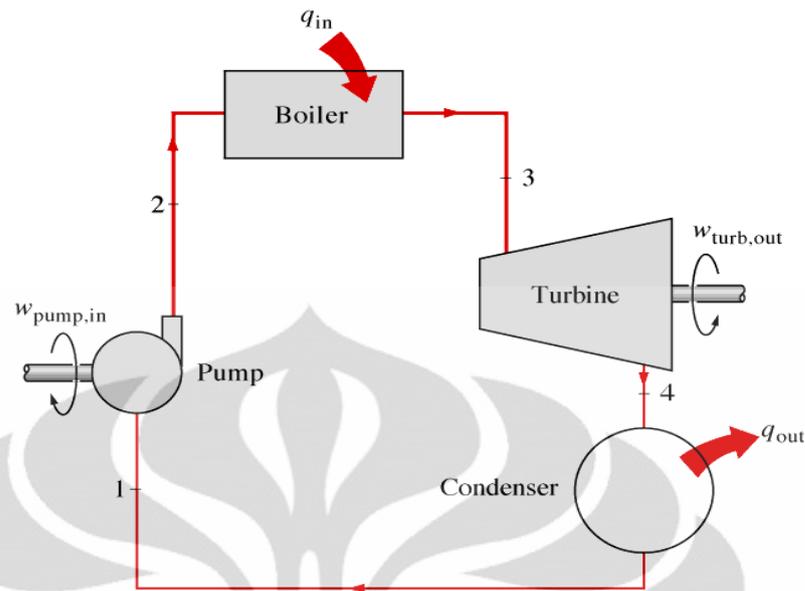
garis temperatur konstan mendekati horizontal pada saat tekanan berkurang yang ditunjukkan pada daerah terarsir pada gambar 2.18.



Gambar 2.18. Diagram entalpi-entropi (Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006)

## 2.7. 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 :



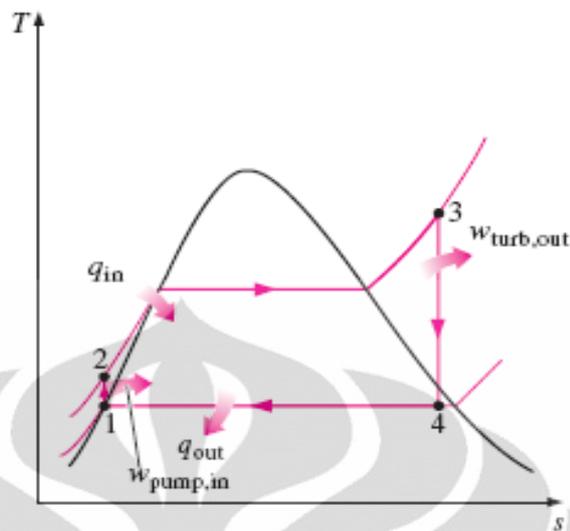
Gambar 2.19. Skema pembangkit listrik tenaga uap  
(Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

## 2.8. Siklus Ideal Turbin Uap

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

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses :

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

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.

## 2.9. Analisa 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

$$q \cdot w = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

atau

$$w_p = h_2 - h_1 \quad (2.41)$$

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

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (2.42)$$

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

$$w_t = h_3 - h_4 \quad (2.43)$$

di mana  $\dot{m}$  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

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad (2.44)$$

di mana  $q_{out}$  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.

$$\eta_{th} = \frac{w_t - w_p}{q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (2.45)$$

#### 2.10. Analisa overall efficiency

Analisa overall efficiency adalah efisiensi keseluruhan suatu sistem PLTU yang merupakan perbandingan antara energi yang dimasukkan kedalam sistem yaitu berupa energi yang berasal dari bahan bakar dengan energi yang dihasilkan oleh sistem berupa daya listrik yang dihasilkan oleh generator dan dinyatakan dalam persamaan.

$$\eta_{overall} = \frac{W_{generator}}{Q_{bahan\ bakar}} \times 100\% \quad (2.46)$$

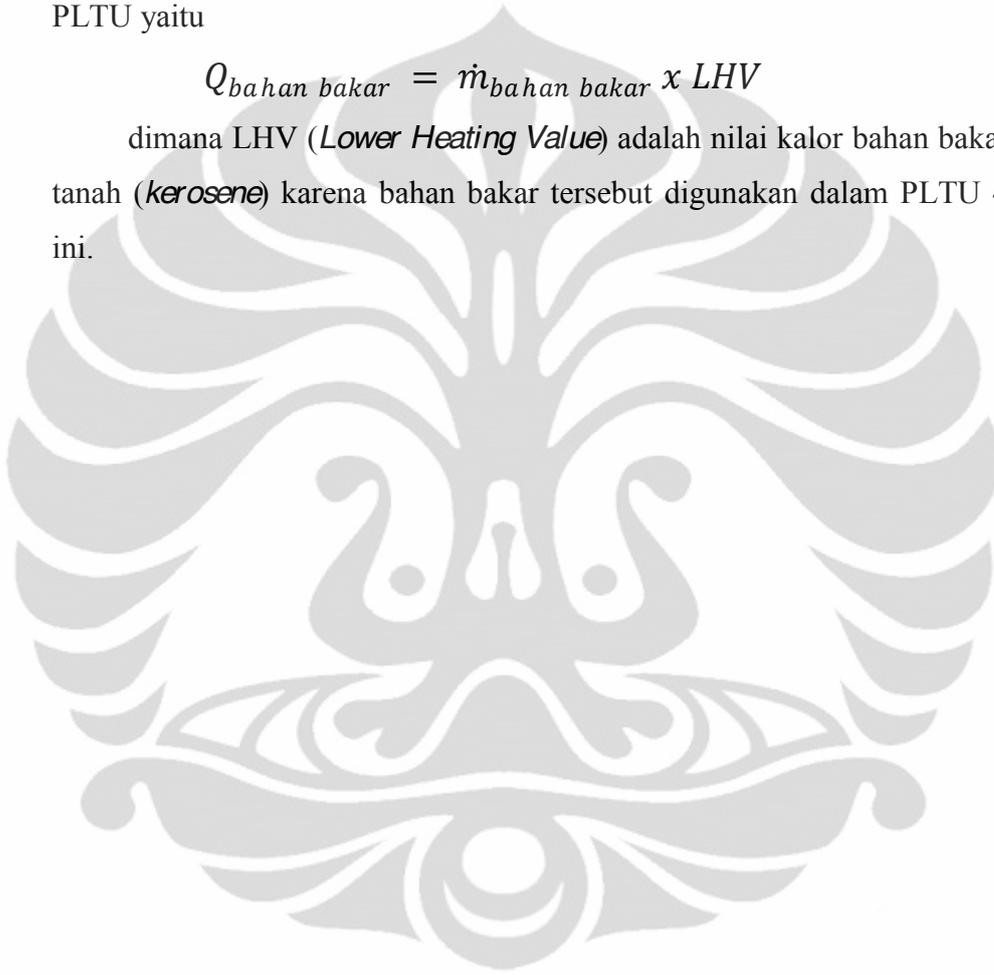
dimana kerja yang dihasilkan oleh generator merupakan daya listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem dimana

$$W_{generator} = V.A \quad (2.47)$$

sedangkan jumlah energi bahan bakar yang dimasukkan kedalam sistem PLTU yaitu

$$Q_{bahan\ bakar} = \dot{m}_{bahan\ bakar} \times LHV \quad (2.48)$$

dimana LHV (*Lower Heating Value*) adalah nilai kalor bahan bakar minyak tanah (*kerosene*) karena bahan bakar tersebut digunakan dalam PLTU 450 Watt ini.



## BAB 3

### PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN

#### 3.1 Miniatur PLTU

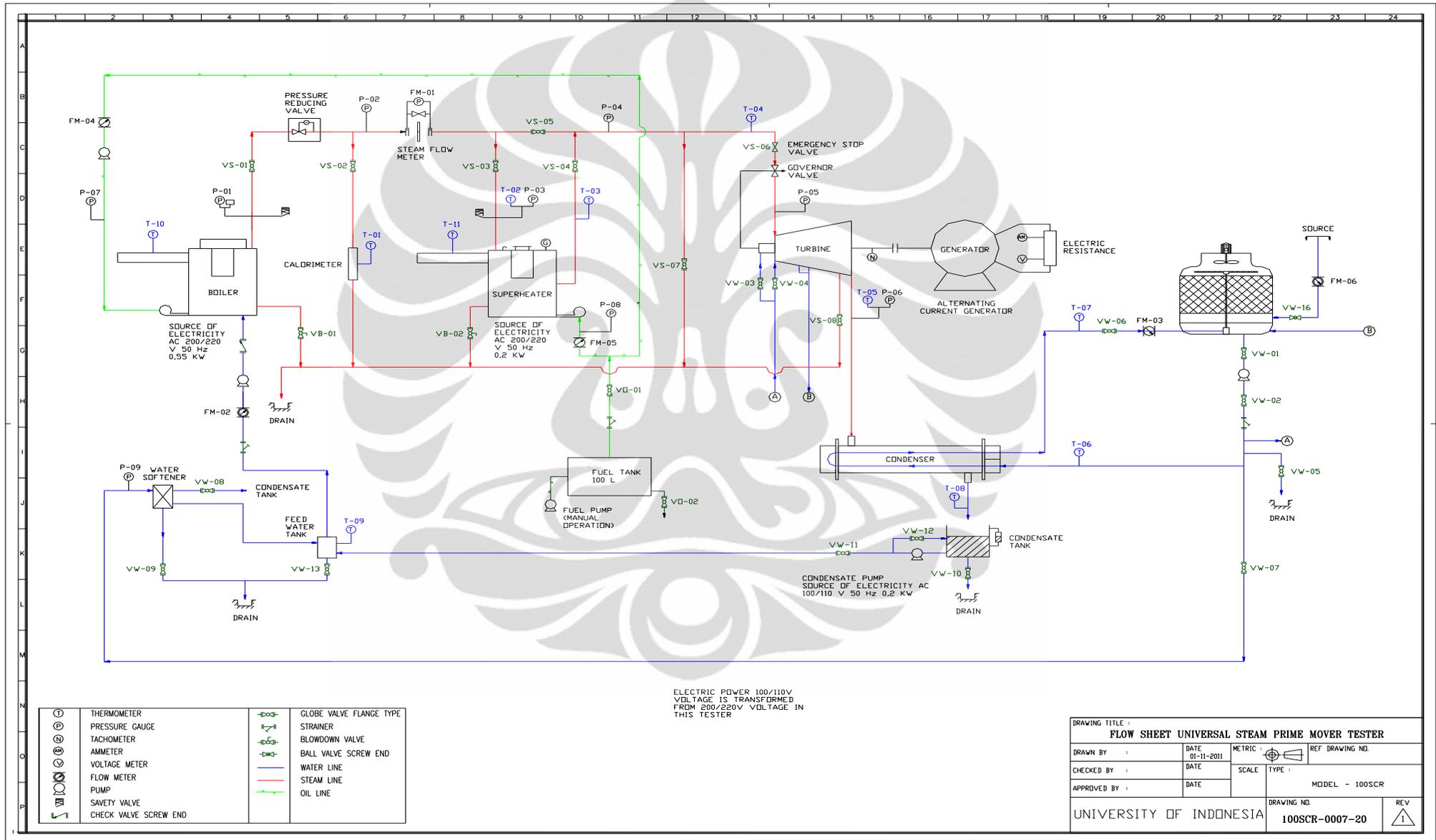
Miniatur Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ini diproduksi oleh SNM (Shin Nippon Machinery) dengan TIPE 100-SCR bertujuan untuk meniru PLTU sebenarnya yang memiliki ukuran yang sangat besar. Miniatur sederhana ini dibuat sebagai bahan studi bagi mahasiswa untuk mempelajari PLTU.

PLTU ini memiliki beberapa komponen utama diantaranya yaitu boiler, *superheater*, turbin, kondenser dan pompa. PLTU menggunakan siklus tertutup yang artinya uap yang digunakan akan disirkulasikan kembali dalam fase yang berbeda yaitu fase cair. Oleh sebab itu, kondenser dan pompa digunakan dalam siklus ini. Kondenser berfungsi untuk mengkondensasikan atau mengembunkan uap yang keluar dari turbin. Sedangkan pompa digunakan untuk menyuplai air masuk kedalam boiler. Tekanan yang dihasilkan oleh pompa harus lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan yang ada didalam boiler agar terjadi aliran fluida.

Berbeda dengan PLTU pada umumnya, PLTU ini memiliki boiler dan *superheater* yang terpisah serta masing-masing memiliki *burner*. Sebagai alat yang digunakan dalam penelitian maka hal ini sangat menguntungkan karena dapat diketahui perbedaan karakteristik PLTU jika menggunakan *superheater* atau tanpa menggunakan *superheater*.

#### 3.2 Skematik alat uji

Skematik alat uji ini ditunjukkan oleh P&ID pada gambar 3.1 yang sudah dimodifikasi dari P&ID sebenarnya yang dikeluarkan oleh Shin Nippon Machinery, karena alat uji ini juga sudah mengalami beberapa perbaikan dan modifikasi. Dari P&ID tersebut dapat terlihat dengan jelas bahwa terdapat tiga buah aliran fluida pada masing-masing pipa yang dibedakan menurut warna. Biru untuk aliran air, merah untuk aliran uap dan hijau untuk aliran bahan bakar berupa minyak tanah.



Gambar 3.1. P&ID PLTU Laboratorium Departemen Teknik Mesin FTUI

### 3.3 Prinsip kerja alat uji

Prinsip kerja dari alat uji ini secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu :

1. Proses aliran uap
2. Proses aliran air
3. Proses aliran bahan bakar

#### 3.3.1 Proses Aliran Uap

Skema aliran uap dari miniatur PLTU ini ditunjukkan pada gambar 3.1. Pertama air mentah (*raw water*) dipompakan dari *feed water tank* kedalam ketel uap (boiler) dengan menggunakan *feed water pump*. Tekanan maksimum yang dapat dicapai adalah 8,5 barg.

*Boiler* yang digunakan pada pengujian ini adalah jenis *boiler* pipa air satu lintasan yang menggunakan *fixed burner* dengan bahan bakar minyak tanah. Setelah burner dinyalakan maka temperatur air didalam pipa *boiler* ini akan mengalami kenaikan. Kenaikan temperatur ini melampaui titik didih dari air yang menyebabkan air berubah fasa menjadi uap jenuh. Uap jenuh yang dihasilkan ini kemudian dialirkan melalui sistem pemipaan dan akan melewati katup penurunan tekanan (*pressure reducing valve*) sehingga tekanannya turun menjadi sekitar 6 barg.

Uap jenuh dari *boiler* dapat langsung dialirkan menuju turbin dengan melewati katup *bypass* tanpa melewati *superheater*. Yaitu dengan cara membuka katup *bypass* dan menutup katup masuk ke *superheater*. Tetapi jika diinginkan kenaikan temperatur agar uap jenuh tersebut berubah menjadi uap panas lanjut maka katup *bypass* harus ditutup dan membuka katup masuk ke *superheater*.

Uap panas lanjut yang dibangkitkan *superheater* kemudian digunakan untuk memutar sudu turbin melalui sebuah nosel. Uap yang keluar dari nosel akan menumbuk sudu turbin dan akan mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik yang akan memutar poros turbin. Putaran poros turbin akan dirubah menjadi energi listrik oleh generator AC yang porosnya dikopel dengan poros turbin.

Uap yang keluar dari turbin kemudian dialirkan menuju kondenser untuk dikondensasikan. Kondenser ini terdiri dari *tube-tube* yang dialiri air pendingin yang berasal dari *cooling tower*. Air hasil kondensasi atau disebut kondensat kemudian ditampung didalam tangki kondensat. Kemudian dengan menggunakan pompa, kondensat ini dialirkan menuju *feed water tank* dan kembali dipompakan masuk kedalam boiler.

### 3.3.2 Proses Aliran Air

Skema aliran air dari miniatur PLTU ini ditunjukkan pada gambar 3.1. Pertama air dari sumber akan ditampung didalam tangki penampungan *cooling tower*. Kemudian air akan dipompa dengan menggunakan *circulation water pump* kedalam *powerplant*. Secara garis besar pembagian jalur air ini dibagi menjadi dua bagian diantaranya yaitu :

#### 1. Sirkulasi air pendingin (*cooling water circulation*)

Sirkulasi air pendingin ini juga dibagi lagi kedalam dua bagian yaitu :

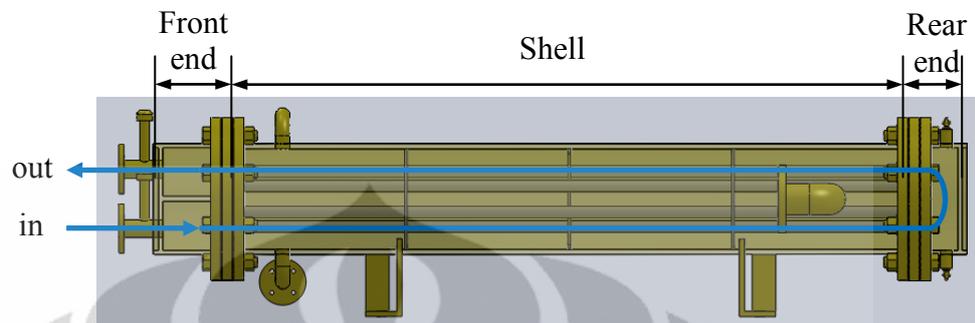
##### a. Air pendingin oli dan bearing pada turbin

Air ini mengalir melalui titik percabangan dari saluran pipa air utama kemudian dibagi lagi menjadi dua saluran pipa yang mengalir untuk mendinginkan oli dan bearing pada turbin. Kemudian air tersebut mengalir keluar pada sebuah saluran yang akan menuju ke tangki penampungan *cooling tower*.

##### b. Air pendingin kondenser

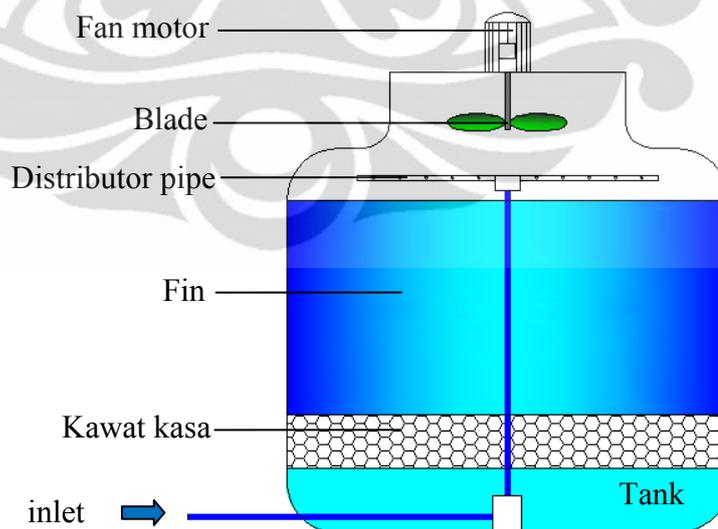
Air yang masuk kedalam kondenser ini berfungsi untuk menyerap kalor yang terdapat pada uap yang melewati kondenser sehingga uap tersebut dapat berubah fasa menjadi cair. Air dari *cooling tower* kemudian mengalir kedalam kondenser yang didalamnya terdiri dari *tube-tube* dengan bantuan *circulation water pump*. Kondenser ini memiliki dua lintasan (*two pass*) dan terbagi menjadi tiga bagian utama yaitu *front end*, *shell*, dan *rear end*, seperti tampak pada gambar 3.2. Pertama air masuk pada *front end* yang didalamnya terdapat *separator plate* yang memisahkan antara sisi masuk dan sisi keluar air pendingin. Kemudian air mengalir kedalam *shell* melalui *tube-tube* pada lintasan pertama dan keluar pada bagian rear end. Pada bagian ini air berputar arah dan masuk kedalam

*tube-tube* pada lintasan kedua dan akhirnya keluar dari kondenser setelah melewati bagian *front end* kembali.



Gambar 3.2. Aliran air pada kondenser

Air yang keluar dari kondenser temperaturnya akan meningkat dan akan sebanding dengan penurunan temperatur pada uap yang berubah fasa menjadi cair. Kemudian air ini akan mengalir menuju *cooling tower* untuk didinginkan kembali dengan menggunakan sebuah *fan*. Air akan jatuh secara merata pada bagian atas *fin* dengan menggunakan *distributor pipe* yang berputar. *Fin* berfungsi untuk memperbesar luas permukaan pendinginan sehingga mempercepat proses pendinginan air. Seperti tampak pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. *Cooling tower*

## 2. Air pengumpan (*feed water*)

Air pengumpan merupakan air yang digunakan oleh PLTU untuk diubah menjadi uap. Kualitas dari air pengumpan ini harus baik karena akan sangat berpengaruh pada peralatan pada suatu PLTU. Oleh sebab itu maka digunakan suatu alat yang dinamakan *water softener*, alat ini berfungsi untuk membersihkan air mentah dari kotoran-kotoran berupa mineral yang dapat menyebabkan kerak pada pipa-pipa pada sistem turbin uap.

Air mentah (*raw water*) dari tangki *cooling tower* akan dipompakan dan masuk kedalam *water softener*. Kemudian dari *water softener* ini akan dihasilkan air yang sudah dilunakkan dan akan ditampung pada tangki air pengumpan (*feed water tank*) dan juga tangki kondensat (*condensate tank*). Hal tersebut dilakukan hanya pada saat awal pengoperasian PLTU tetapi jika PLTU sudah beroperasi dengan stabil maka saluran air dari *water softener* akan ditutup.

Air dari *feed water tank* kemudian dipompakan oleh *feed water pump* kedalam *boiler* untuk menekan air sampai tekanan maksimum 8,5 barg.

### 3.3.3 Proses Aliran Bahan Bakar

Skema aliran bahan bakar dari miniatur PLTU ini ditunjukkan pada gambar 1.1. PLTU ini menggunakan minyak tanah sebagai bahan bakarnya. Dari tangki bahan bakar maka minyak tanah akan dipompa dan didistribusikan ke burner yang masing-masing terdapat pada boiler dan *superheater*. Sebelumnya minyak tanah akan melewati sebuah saringan yang disebut dengan strainer.

## 3.4 Kondisi pengujian

Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan *superheater* dengan pengaturan temperatur pada 215°C. Proses pengujian dilakukan dengan cara menghidupkan empat buah lampu pijar dimana tiga buah lampu pijar tersebut berdaya 100 Watt dan satu buah lagi berdaya 150 Watt. Lampu-lampu ini digunakan sebagai beban dari PLTU dimana poros generatornya telah dikopel dengan poros turbin. Pengujian dilakukan dengan menaikkan beban secara bertahap sehingga pada akhirnya dicapai pembebanan sebesar 450 Watt.

### 3.5 Komponen alat uji

#### 1. *Boiler* (ketel uap)

Jenis *boiler* yang terdapat pada alat pengujian yaitu jenis *one through boiler*. Pada *boiler* ini air akan masuk dari ujung *tube* kemudian dilakukan proses pemanasan air sehingga berubah fasa menjadi uap dan uap ini akan keluar dari ujung *tube* lainnya dengan diameter dari *exhaust tube* ini sebesar 165mm.

*Boiler* jenis ini memiliki beberapa keuntungan diantaranya yaitu :

- a. Konstruksinya sederhana dan ringan
- b. Waktu start up yang lebih pendek sehingga sangat cocok untuk kepentingan penelitian
- c. Karena menggunakan *multitube* yang berukuran kecil dan air masuk dengan bantuan *feed water pump* maka *boiler* jenis ini dapat menghasilkan uap bertekanan tinggi.

*Boiler* jenis ini juga memiliki beberapa kerugian antara lain :

- a. Kualitas air pengisi ketel harus baik karena ukuran *tube* yang kecil
- b. Tekanan pada beban yang bervariasi mudah berubah akibat ruang air pada *boiler* berukuran kecil.



Gambar 3.4. *Boiler*

Berikut ini adalah data spesifikasi dari *boiler* yang digunakan pada alat pengujian :

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| a. Tipe                                   | : <i>water tube pipe</i>  |
| b. Tekanan operasi maksimum               | : 10 kg/cm <sup>2</sup>   |
| c. <i>Equivalent evaporative quantity</i> | : 130 kg/jam              |
| d. <i>Heat transmission area</i>          | : 2,38 m <sup>2</sup>     |
| e. Berat bersih                           | : 410 kg                  |
| f. Berat pada waktu operasi               | : 483 kg                  |
| g. Bahan bakar                            | : light oil               |
| h. Konsumsi bahan bakar                   | : 10,6 liter/jam          |
| i. <i>Electric source</i>                 | : AC 220V / 200 V 0,55 kW |

### 3. *Superheater* (pemanas lanjut)

Cara kerja *superheater* hampir sama dengan *boiler* hanya saja *superheater* digunakan untuk memanaskan ulang uap yang keluar dari *boiler* sehingga dapat dihasilkan uap yang kering. *Superheater* terdiri dari dua jenis yaitu independent *superheater* dan integral *superheater*. Pada alat pengujian, *superheater* yang digunakan adalah jenis independent *superheater* karena kedudukannya terpisah dari *boiler*.



Gambar 3.5. *Superheater*

Berikut ini adalah data spesifikasi dari *superheater* yang digunakan pada alat penguji :

- a. Tekanan operasi maksimum : 10 kg/cm<sup>2</sup>
- b. Temperatur kerja maksimum : 280 °C
- c. *Heating value* : 6000 kcal/jam
- d. *Heat transmission area* : 2,4 m<sup>2</sup>
- e. Berat bersih : 400 kg
- f. Bahan bakar : light oil
- g. Konsumsi bahan bakar : 3,9 liter/jam
- h. *Electric source* : AC 220V / 200 V

#### 4. Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Turbin yang digunakan pada alat penguji adalah jenis turbin impuls dengan konstruksi sebagai berikut :

- a. *Turbin casing* dan *steam chamber*
- b. Poros turbin dan rotor
- c. Sudu turbin (*turbine blade*)
- d. Nosel
- e. *Gland packing*
- f. Bantalan (*bearing*)



Gambar 3.6. Turbin uap

Berikut ini adalah data spesifikasi dari turbin uap yang digunakan pada alat penguji :

- a. Tipe : Impuls, single stage
- b. Output : maksimum 0,4 kW
- c. Kecepatan : 3600 rpm
- d. Kondisi uap : tekanan masuk 6 kg/cm<sup>2</sup>  
tekanan keluar adalah tekanan atmosfer
- e. Konsumsi uap : 90 kg/jam

### 5. Generator

Generator berfungsi untuk mengkonversikan energi putaran pada turbin menjadi energi listrik. Generator ini memiliki batas putaran maksimum yaitu 4000 rpm dengan efisiensi 70%.



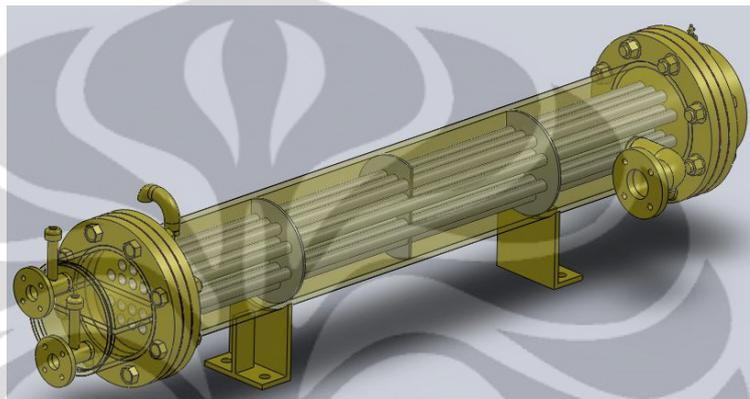
Gambar 3.7. Generator

Berikut ini adalah data spesifikasi dari generator yang digunakan pada alat penguji :

- a. Tipe : Generator AC
- b. Output : maksimum 0,4 kW
- c. Tegangan : 110 Volt
- d. Dimensi : 360x270x160 mm
- e. Berat : 20 kg
- f. Electric current : 3,64 A

## 6. Kondenser

Jenis kondenser yang digunakan dalam alat pengujian ini adalah jenis kondenser permukaan artinya fluida yang akan didinginkan (uap) tidak kontak secara langsung dengan fluida pendingin. Air pendingin masuk ke dalam *tube-tube* yang berada di dalam kondenser kemudian mengondensasi uap yang berada di luar *tube*.



Gambar 3.8. Kondenser

Berikut ini adalah data spesifikasi dari kondenser yang digunakan pada alat pengujian :

- a. Tipe : *pitch and tube*
- b. *Cooling surface area* : 1,5 m<sup>2</sup>
- c. *Cooling water quantity* : 2,5 m<sup>3</sup>/jam

## 8. *Water softener* (pelunak air)

*Water softener* adalah suatu peralatan pengujian yang berfungsi untuk membuang kotoran-kotoran ataupun mineral-mineral berupa kalsium dan magnesium yang terkandung di dalam air yang dapat menyebabkan kerugian pada sistem yang pada akhirnya mengurangi efisiensi sistem keseluruhan. *Water softener* terdiri dari beberapa katup yang berfungsi untuk mengolah air menjadi air lunak (*soft water*), yaitu katup *back wash*, katup *regeneration* dan *push out*, katup *rinsing* dan katup *soft water* dimana masing-masing katup akan meregenerasikan air menjadi *soft water*. Dengan urutan proses sebagai berikut :

a. *Adjustment of salt water for regeneration*

Masukan sejumlah garam kedalam tangki regenerasi, kemudian larutkan dengan air. Jika air (*raw water*) memiliki kualitas yang rendah, maka *soft water* dapat digunakan untuk proses pelarutan garam

b. *Back wash*

Setelah melakukan pengaturan *rotary valve* ke *back wash*, kemudian buka katup *raw water*. Atur katup sampai pelampung pada flow meter naik selama 15 menit. Jika *drained water* terlihat kotor, maka lakukan langkah tersebut sampai didapatkan kondisi air yang bersih. Apabila terjadi kenaikan tekanan pada *pressure gauge* secara tiba-tiba, hal ini diakibatkan oleh lapisan diaion tidak larut sempurna sehingga terjadi kerak dan menghalangi jalur *soft water*.

c. *Regeneration, push out*

Pindahkan posisi *rotary valve* pada posisi “regeneration”. Buka katup *raw water*, atur bukaan katup *raw water* sampai terlihat pada *flow meter* menunjukkan bahwa air mengalir dengan kecepatan tertentu, kemudian pastikan bahwa tekanan di *pressure gauge* berada pada 1,5-3,0 kg/cm. langkah selanjutnya adalah membuka katup *salt water*. Atur jumlah garam dan air sehingga komposisinya adalah 10% garam dan 90% air. Tunggu proses berjalan selama 15-30 menit. Jika *salt water* sudah kosong, segera tutup katup suction. Biarkan air mengalir dari katup *discharge* di dalam column. Jika proses tersebut sudah selesai maka katup *raw water* segera di tutup

d. *Rinsing*

Pindahkan posisi *rotary valve* pada posisi “*rinsing*”, buka katup *raw water*. Atur bukaan katup *raw water* sampai terbaca di flow meter dan biarkan air mengalir dari katup discharge selama 30 menit. Jika air berubah menjadi biru, hentikan proses rinsing dan segera tutup katup *raw water*.

e. *Soft water*

Pindahkan posisi *rotary valve* pada posisi “*Soft water*”, buka katup *raw water* sampai terbaca perubahan aliran di *flow meter*.



Gambar 3.9. *Water softener*

### 7. Feed water tank

*Feed water tank* berada pada bagian atas boiler. Penempatan ini karena air dari *feed water tank* akan dipompa ke dalam boiler. Air pengisi bagian ini berasal dari *condensate tank* yang juga di alirkan menggunakan pompa. Pengisian *feed water tank* dilakukan dengan cara menyalakan pompa kondensat secara manual jika air didalamnya sudah mendekati habis. Hal ini dikarenakan sistem otomatis pompa sudah tidak berfungsi.



Gambar 3.10. *Feed Water Tank*



Gambar 3.11. Pompa kondensat

### 8. *Condensate tank*

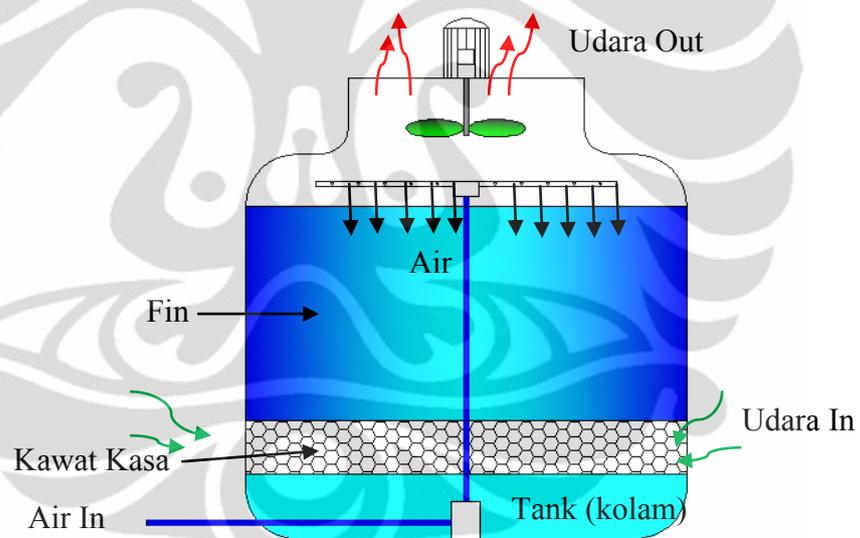
*Condensate tank* merupakan wadah air dari condenser. Air ini berasal dari uap yang sudah mengalami kondensasi di dalam condenser. Untuk menjaga air tetap dalam kondisi bersih, maka bagian ini sudah di *hotdip* agar tidak terjadi karat yang mengakibatkan air menjadi kotor. Volume dari *condensate tank* adalah 50 liter.

### 9. *Cooling tower*

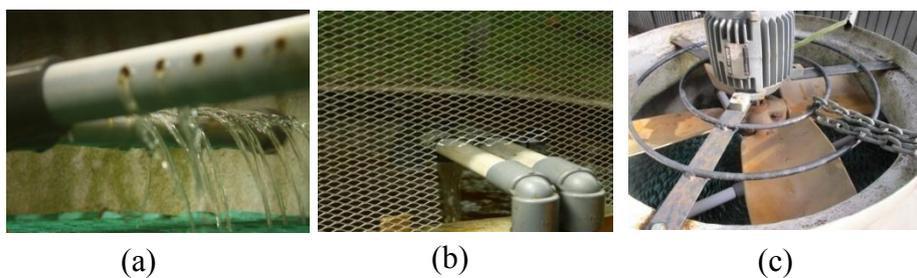
*Cooling tower* berfungsi sebagai pendingin condenser, turbin dan sebagai penyedia *raw water* pada saat awal operasi power plant. Jenis *cooling tower* yang digunakan adalah *induced draft counter flow tower*. Air panas masuk dari bagian atas kemudian di semprotkan ke bawah menuju *fill* melalui nosel yang terletak pada pipa pengarah (*distributor pipe*) yang berputar. Aliran air dan udara berlawanan arah, dimana udara masuk dari bagian bawah (kawat kasa) *cooling tower* menggunakan *induced draft fan*.



Gambar 3.12. *Condensate Tank*



Gambar 3.13. Skema *cooling tower*



Gambar 3.14. (a) *distributor pipe*, (b) kawat kasa, (c) *induced draft fan*

Gambar 3.15. *Cooling Tower*

### 10. *Fuel tank*

*Fuel tank* adalah wadah penampung bahan bakar dengan kapasitas 100 liter. Pada bagian atas dilengkapi dengan level bahan bakar. Sebelum melakukan pengujian, sebaiknya kita memeriksa level bahan bakar agar pada saat pengujian supply bahan bakar tidak terganggu. Apabila hal ini tidak dilakukan, maka boiler dan *superheater* tidak dapat bekerja. Selain itu, jika terjadi kekosongan bahan bakar, maka filter sebelum burner akan mengalami masalah dimana banyak udara terjebak didalamnya yang mengakibatkan burner susah menyala.



(a)



(b)

Gambar 3.16. (a) *Fuel Tank*, (b) level bahan bakar

### 11. *Feed water pump*

Untuk mengalirkan air dari *condensate tank* ke *feed water tank* di gunakan pompa



Gambar 3.17. *Feed Water Pump*

### 12. *Circulating water pump*

Untuk mendistribusikan kebutuhan air power plant digunakan *circulating water pump* tipe sentrifugal. Pompa ini mendistribusikan air mulai dari *cooling tower*, kondenser, pendingin turbin dan air umpan *condensate tank* pada awal operasi.



Gambar 3.18. *Circulating Water Pump*

### 13. Peralatan Pengaman

Adanya kontrol pengaman pada pembangkit listrik tenaga uap bertujuan untuk keselamatan bagi operator dan pengaman bagi peralatan-peralatan didalamnya. Alat-alat pengaman tersebut diantaranya adalah :

a. Pengukur volume air (*water level gauge*)

Alat ini berfungsi untuk mengukur volume air yang dialirkan melalui pipa didalam *boiler*. Alat ini dihubungkan dengan saklar tekanan (*pressure switch*) sebagai pemutus otomatis aliran listrik pompa *feed water* apabila

volume dan tekanan air telah maksimal dan sebaliknya. Alat ini juga *disambung fixed burner* dengan saklar otomatis sehingga *fixed burner* akan berhenti jika pemanasan telah maksimal dengan memutuskan aliran listriknya dan menyalakan alarm *abnormal feed water*.

b. Pendeteksi nyala api (*flame detector*)

Alat ini akan mendeteksi nyala api dari *fixed burner* yang disambungkan dengan saklar pemutus aliran motor *burner* secara otomatis sehingga nyala api terhenti dan alarm *abnormal combustion* akan menyala jika apinya tidak normal. Komponen ini juga disambung dengan kabel pengaman yang akan menyambung aliran listrik bila tombol resetnya ditekan.

c. Pembatas tekanan uap (*steam pressure limiter*)

Alat ini bertujuan untuk membatasi tekanan uap pada alat penguji. Alat ini akan memutus aliran listrik dari motor *burner* apabila tekanannya mencapai tekanan maksimum ( $10 \text{ kg/cm}^2$ ) dan aliran listrik akan tersambung kembali apabila tekanan berada dibawah tekanan yang telah ditentukan.

d. Termostat pembatas temperatur (*overheat protective thermostat*)

Alat ini mengukur temperatur ketel dan memutus aliran listrik dari *burner* jika temperatur ketel melampaui batas yang telah ditentukan dan alarm abnormal temperatur akan menyala.

e. Katup pengaman (*safety valve*)

Katup pegas ini akan membuka apabila tekanan uap pada ketel telah melewati tekanan  $10 \text{ kg/cm}^2$ .

f. Katup penurun tekanan (*pressure reducing valve*)

Alat ini berfungsi untuk menurunkan tekanan uap yang keluar dari ketel. Penurunan tekanan ini digunakan untuk meredam efek tekanan balik apabila katup pencekik governor dalam keadaan tertutup.

g. Pengatur temperatur elektronik (*elektronik temperatur regulator*)

Alat ini berfungsi untuk mengatur temperatur dari sistem pada saat dijalankan oleh operator dan temperatur alat ini adalah 280°C.

h. Relay pemutus temperatur

Berfungsi untuk mematikan *burner* dan alarm abnormal temperatur akan menyala jika temperatur melewati batas yang ditentukan.

i. Komparator

Pembanding putaran poros turbin dengan putaran operasi yang ditentukan oleh penguji dimana putaran maksimumnya adalah 4000 rpm. Bila putaran melebihi batas yang ditentukan maka komparator mengirimkan sinyal listrik ke *emergency shut off selenoid valve* untuk menutup saluran uap kedalam nosel dan kepanel pemanas lanjut untuk mematikan *burner*.

j. *Governor* dan katup pencekik

Alat ini digunakan untuk menjaga poros turbin berputar konstan.

k. *Steam Turbine Emergency Stop device*

Alat ini berfungsi untuk mengentikan turbin uap apabila putaran turbin meningkat sampai 4000 rpm dengan cara menghentikan *burner* pada *superheater* dan menutup *emergency stop valve* pada turbin uap.

### 3.6 Prosedur Pengujian

#### 3.6.1 Prosedur Persiapan

1. Periksa kebersihan Cooling Tower (CT). Jika air didalamnya keruh dan banyak lumpur atau lumut, maka bersihkan. Kemudian buka penutup dibagian bawah CT untuk membuang air.
2. Catat kondisi awal wake up water (FM-06)
3. Buka katup VW-14 untuk mengisi Cooling tower
4. Periksa kebersihan condensate tank. Jika keadaan air keruh, maka buka VW-10 untuk membuang air di dalam condensate tank
5. Periksa level bahan bakar. Jika bahan bakar berada pada batas minimal, maka lakukan pengisian bahan bakar untuk keperluan operasi

6. Catat kondisi awal FM-02 dan FM-03

### 3.6.2 Prosedur Start-Up

1. Nyalakan fan cooling tower
2. Posisikan MCB pada kondisi 1
3. Sambungkan kelistrikan power plant ke panel yang berada di bawah MCB
4. Tutup VW-01 pada posisi fully closed kemudian nyalakan Circulating water pump (pump 1). Buka perlahan VW-01 sampai fully open. Jika air tidak tersirkulasi, maka lakukan prosedur no 7 kembali.
5. Buka VW-08 sampai fully open untuk mengisi condensate tank. Pengisian harus sampai pada batas yang tertera pada gelas penduga
6. Buka VB-01 kemudian perhatikan gelas penduga pada sisi boiler. Jika posisi air sudah mencapai batas bawah dari tanda yang tertera pada gelas penduga, maka tutup kembali VB-01
7. Buka VS-02 dan VS-07 sebanyak dua putaran penuh

### 3.6.3 Prosedur running dan pengambilan data

1. Posisikan saklar boiler pada mode auto
2. Periksa FM-02 untuk memastikan bahwa bahan bakar mengalir kedalam burner boiler
3. Periksa P-07 untuk memastikan bahwa udara masuk kedalam burner boiler
4. Nyalakan saklar *superheater* dan burner *superheater* setelah tekanan pada boiler (P-01) mencapai 5 bar
5. Atur kondisi T-03 yang diinginkan dengan merubah setting point (SP) pada panel *superheater*
6. Buka sedikit VS-04 agar temperature didalam Siperheater terbaca oleh T-03
7. Buka VS-06 dengan cara mengangkat tuas ke atas
8. Tutup (fully closed) VS-02 dan VS-07
9. Buka perlahan VS-04 untuk mengatur putaran turbin. Turbin tidak boleh diputar langsung mencapai 3000 rpm. Lakukan secara bertahap dengan interval waktu lebih kurang 2 menit untuk variasi 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm

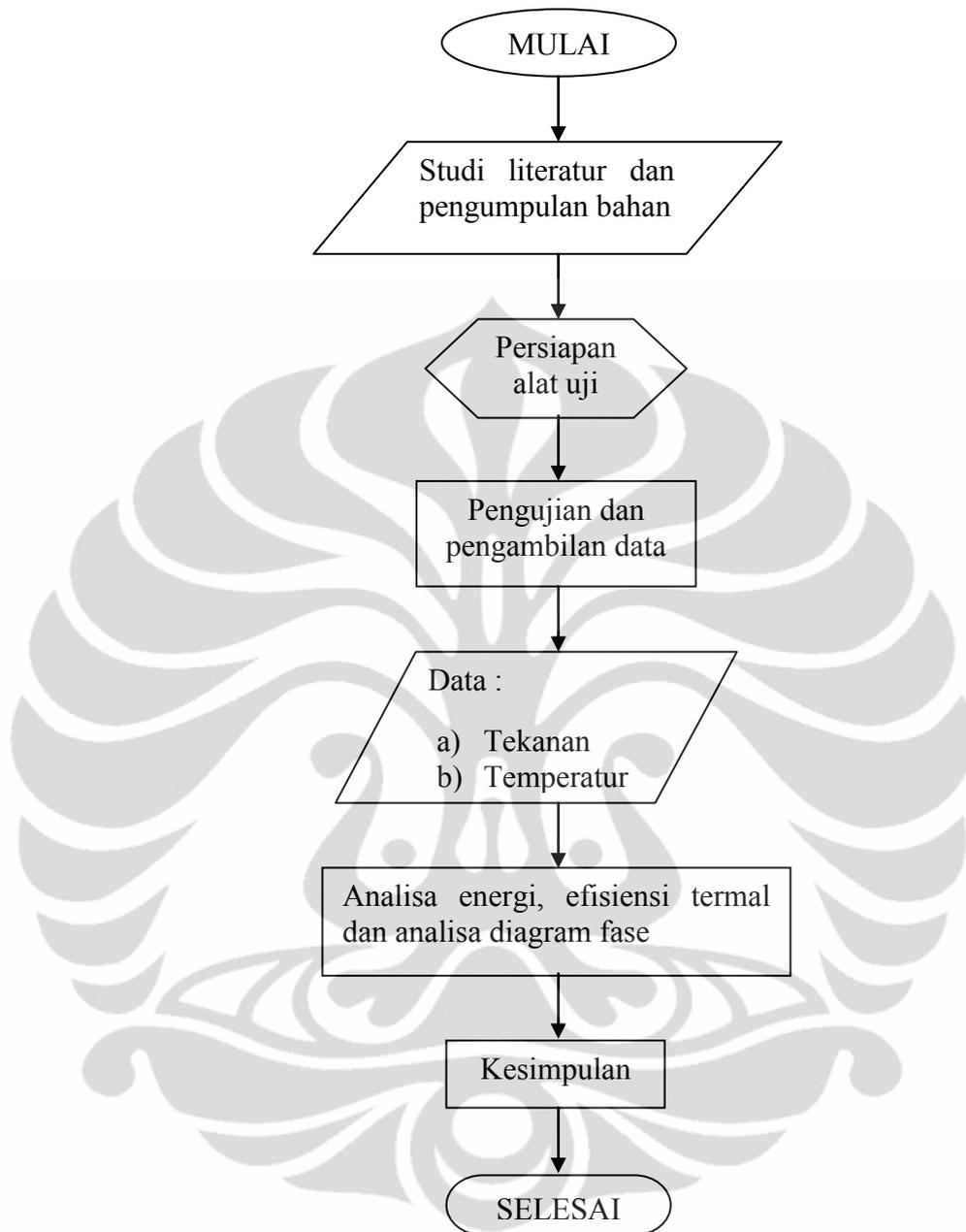
10. Lakukan pembebanan jika putaran turbin sudah konstan di 3000 rpm dan T-03 sudah sesuai dengan Set point yang diinginkan
11. Nyalakan saklar lampu 100 Watt (beban 1)
12. Pertahankan putaran turbin pada 3000 rpm dengan cara membuka VS-04
13. Catat parameter pengukuran (pengambilan data pengujian)
14. Lakukan langkah 11 sampai 13 untuk setiap penambahan beban (200,300 dan 450 Watt)

#### **3.6.4 Prosedur Shut-Down**

1. Turunkan beban dari 450, 300, 200 dan 100 watt dengan cara mematikan lampu beban
2. Atur (tutup secara perlahan)VS-04 agar putaran turbin tetap 3000 rpm untuk setiap penurunan beban
3. Matikan *Superheater* dengan memindahkan saklar pada panel *Superheater* ke posisi off
4. Matikan Boiler dengan memindahkan saklar pada panel Boiler ke posisi off
5. Tutup VS-06 dengan cara menurunkan handle valve jika tekanan pada P-04 sudah mencapai 1 bar
6. Buka VS-02 dan VS-07 jika tekanan P0-1 (Boiler) sudah mencapai 2 bar
7. Matikan circulating water pump
8. Tutup VW-01 (fully closed)
9. Matikan fan Cooling tower dengan memindahkan handle ke bawah
10. Matikan MCB dengan memindahkan saklar pada posisi 0
11. Cabut kabel kelistrikan power plant

#### **3.7 Diagram alir penelitian**

Penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia untuk melakukan pengujian pengujian kinerja dari PLTU tersebut dan menganalisa hasil pengujian. Analisa hasil pengujian dititik beratkan pada analisa energi,efisiensi termal dan diagram fase. Hal tersebut dilakukan agar dapat diketahui karakteristik dari PLTU. Penelitian ini dilakukan sesuai diagram alir proses seperti pada gambar 3.19.



Gambar 3.19. Diagram alir penelitian

## BAB 4 PERHITUNGAN DAN ANALISA HASIL PEGUJIAN

### 4.1. Pengumpulan data

Untuk kondisi pengujian telah dijelaskan pada bab sebelumnya dimana pengujian akan dilakukan dengan menggunakan *superheater* dengan pengaturan temperatur pada 215°C.

Ada beberapa parameter yang diambil dalam pengoperasian PLTU mini dengan menggunakan *superheater*. Parameter-parameter tersebut antara lain tekanan, temperatur, debit air, debit bahan bakar, putaran poros generator, arus listrik dan tegangan listrik. Adapun simbol-simbol yang digunakan diantaranya yaitu

Tabel 4.1. Simbol-simbol pengujian

Simbol	Keterangan
T-01	Temperatur uap keluar dari kalorimeter
T-02	Temperatur uap masuk ke <i>superheater</i>
T-03	Temperatur uap keluar dari <i>superheater</i>
T-04	Temperatur uap masuk ke turbin
T-05	Temperatur uap keluar dari turbin
T-06	Temperatur air pendingin masuk ke kondenser
T-07	Temperatur air pendingin keluar dari kondenser
T-08	Temperatur kondensat keluar dari kondenser
T-09	Temperatur air pada <i>feed water tank</i>
T-10	Temperatur gas keluar dari boiler
T-11	Temperatur gas keluar dari <i>superheater</i>
P-01	Tekanan uap keluar dari boiler
P-02	Tekanan uap keluar dari <i>pressure reducing valve</i>
P-03	Tekanan uap masuk ke <i>superheater</i>
P-04	Tekanan uap keluar dari <i>superheater</i>
P-05	Tekanan uap masuk ke turbin
P-06	Tekanan uap keluar dari turbin
P-07	Tekanan minyak tanah masuk ke boiler

Simbol	Keterangan
P-08	Tekanan minyak tanah masuk <i>superheater</i>
P-09	Tekanan air masuk ke <i>water softener</i>
FM-01	Flow meter uap keluar dari boiler
FM-02	Flow meter air masuk ke boiler
FM-03	Flow meter air pendingin kondenser
FM-04	Flow meter minyak masuk ke boiler
FM-05	Flow meter minyak masuk ke <i>superheater</i>
FM-06	Flow meter air penambah pada <i>cooling tower</i>
A	Ammeter
V	Voltage meter
N	Tachometer

Penggunaan simbol-simbol tersebut digunakan untuk memudahkan dalam proses pengambilan data. Proses pengambilan data ini dilakukan oleh dua orang karena seluruh alat ukur yang digunakan dalam pengujian ini masih analog dan tingkat ketelitian pembacaan alat ukur masih dipengaruhi oleh operator yang melakukan pembacaan tersebut. Data hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 4.2.

#### 4.2. Pengolahan data

Dari hasil pengujian pada tabel 4.2, tidak seluruhnya data tersebut digunakan dan dianalisa. Karena tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sistem dan karakteristik pembangkit listrik tenaga uap terutama pada pembahasan mengenai diagram fase dan analisa energinya. Oleh sebab itu untuk menggambarkan atau menentukan titik-titik pada diagram fase, maka harus ditentukan juga titik-titik pengukurannya. Data untuk menentukan titik tersebut adalah data tekanan dan temperatur.

Setelah titik-titik tersebut diperoleh, langkah selanjutnya yaitu dari data tekanan dan temperatur maka didapatkan nilai-nilai entalpi dan volume spesifik, seperti ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.2. Data pengujian dengan pengaturan temperatur *superheater* 215°C

Simbol	Waktu						Dimensi
	Kondisi Awal	11:29	11:35	11:41	11:47	11:50	
		100	200	300	450	450	Watt
T-01	28	98	94	86	80	78	C
T-02	28	170	170	170	170	168	C
T-03	29	217	212	218	215	215	C
T-04	28	164	168	169	173	173	C
T-05	28	95	91	104	106	108	C
T-06	28	31	34	33	33	33	C
T-07	28	50	54	54	58	58	C
T-08	31	76	78	79	81	81	C
T-09	29	28	30	35	38	37	C
T-10							C
T-11							C
P-01	0	8	8,5	8,5	7,5	7,5	barg
P-02	0	6	6	6	6	6	barg
P-03	0,5	6,2	6,3	6,3	6	6	barg
P-04	0	3,5	3,5	4	5	5	barg
P-05	0	3	3,2	3,4	4	4,2	barg
P-06	0	0	0	0	0	0	barg
P-07	0	9	9	9	9	9	barg
P-08	0	7	8	7	7	8	barg
P-09	0,2	3	3	3	3	3	barg
FM-01							barg
FM-02	23/099	23/167	23/171	23/179	23/185	23/193	m <sup>3</sup> /ℓ
FM-03	431/185						m <sup>3</sup> /ℓ
FM-04	1394,1	1402,3	1403,6	1404,2	1405,7	1405,9	ℓ
FM-05	137,8	139,5	139,7	140	140,4	140,6	ℓ
FM-06	2.240	2.401	2.401	2.401	2.401	2.480	m <sup>3</sup>
A	0	1	1,8	2,6	4	4	A
V	0	105	105	105	105	105	Volt
N	0	3000	3000	3000	3200	3100	rpm

Tabel 4.3. Set point *superheater* 215 °C dengan beban 450 W

No.	Tekanan (bara)	Temperatur (°C)	Volume spesifik (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpi (kJ/kg)
1	1	37	0,0010067	155,08
2	8,5			
3	8,5	172,94	0,22689	2770,8
4	7	168	0,27526	2770,4
5	6	215	0,36485	2883,2
6	5,2	173	0,38151	2795,5
7	1	108	1,735	2692,3
8	1	81	0,0010297	339,25

Nilai tekanan diatas merupakan tekanan absolut yang didapatkan dengan cara menggunakan persamaan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Nilai volume spesifik dan entalpi dapat diperoleh dengan menggunakan tabel A5 dan A6 atau juga dengan menggunakan software REFPROP. Pada tabel 4.3, data yang diperoleh menggunakan REFPROP karena proses pembuatan diagram fase juga menggunakan software tersebut.

### 4.3. Analisa hasil pengujian

#### 4.3.1 Analisa energi

Energi yang dihasilkan oleh turbin merupakan kerja yang dihasilkan oleh sistem. Dengan menggunakan persamaan 2.35 diketahui bahwa kalor netto pada turbin dikurangi dengan kerja netto yang dihasilkan akan sama dengan jumlah perubahan entalpi, perubahan energi kinetik, dan perubahan energi potensial maka,

$$q - w = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Pada pembahasan di bab sebelumnya juga telah dijelaskan bahwa perubahan energi kinetik (*ek*) dan energi potensial (*ep*) nilainya sangat kecil dibandingkan dengan nilai perubahan entalpinya maka nilai *ep* dan *ek* dapat diabaikan. Didalam turbin juga diasumsikan bahwa tidak ada perpindahan kalor yang terjadi, baik dalam atau dari luar sistem yang melewati batas volume atur dari turbin.

Selisih antara entalpi pada saat masuk turbin yaitu pada titik 6 dan entalpi pada saat keluar dari turbin pada titik 7, sehingga energi yang dihasilkan oleh turbin menjadi,

$$\begin{aligned} w_{out, turbine} &= h_6 - h_7 \\ &= 2795,5 - 2692,3 \\ &= 103,2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Energi yang diberikan oleh pompa merupakan selisih antara tekanan keluar pompa yaitu pada titik 2 dengan tekanan masuk pompa yaitu pada titik 1 dan hasilnya dikalikan dengan nilai volume spesifik air pada saat masuk pompa, sehingga diperoleh kerja yang dilakukan oleh pompa,

$$\begin{aligned} w_{in, pump} &= v_1(P_2 - P_1) \\ &= 0,0010067 (850 - 100) \\ &= 0,755025 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Energi kalor yang dimasukkan boiler dalam sistem merupakan selisih nilai entalpi pada saat keluar dari boiler dan entalpi pada saat masuk boiler. Selain itu diasumsikan bahwa tidak ada kalor yang terbuang selama proses ini berlangsung dan tidak ada kerja netto yang dihasilkan pada proses ini, sehingga persamaan 2.35 dapat disederhanakan menjadi,

$$\begin{aligned} q_{in, boiler} &= h_3 - h_2 \\ &= 2770,8 - (h_1 + W_{pump}) \\ &= 2770,8 - (155,08 + 0,755025) \\ &= 2614,965 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Energi kalor yang dimasukkan *superheater* dalam sistem merupakan selisih nilai entalpi pada saat masuk turbin dan entalpi pada saat masuk *superheater*. Sama halnya dengan boiler maka pada *superheater* juga diasumsikan bahwa tidak ada kalor yang terbuang selama proses ini berlangsung dan tidak ada kerja netto

yang dihasilkan pada proses ini, sehingga persamaan 2.35 dapat disederhanakan menjadi,

$$\begin{aligned} q_{in, \text{ super heater}} &= h_5 - h_4 \\ &= 2883,2 - 2770,4 \\ &= 112,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Akan tetapi pada saat energi tersebut dimasukkan atau pada saat pendistribusian uap sampai ke titik 6 dimana uap akan masuk ke turbin ada beberapa *losses* atau kehilangan energi. Hal tersebut diketahui dengan adanya penurunan nilai entalpi, ada dua buah *losses* yang terjadi diantaranya yaitu

$$\begin{aligned} q_{losses \ 1} &= h_3 - h_4 \\ &= 2770,8 - 2770,4 \\ &= 0,4 \text{ kJ/kg} \\ q_{losses \ 2} &= h_5 - h_6 \\ &= 2883,2 - 2795,5 \\ &= 87,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Pada kondenser, untuk mengkondensasikan uap maka kalor yang terdapat didalamnya harus dibuang yaitu dengan cara penyerapan kalor oleh fluida pendingin. Tidak ada kalor yang dimasukkan selama proses ini berlangsung dan tidak ada kerja netto yang dihasilkan pada proses ini, sehingga persamaan 2.35 dapat disederhanakan menjadi,

$$\begin{aligned} q_{out, \text{ condenser}} &= h_7 - h_8 \\ &= 2692,3 - 339,25 \\ &= 2353,05 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Seperti pada kondenser maka pada tangki kondensat juga terjadi pelepasan kalor, tetapi pelepasan kalor ini disebabkan karena pencampuran kondensat

bertemperatur tinggi dengan air yang ada pada tangki kondensat. Tidak ada kalor yang dimasukkan selama proses ini berlangsung dan tidak ada kerja netto yang dihasilkan pada proses ini, sehingga persamaan 2.35 dapat disederhanakan menjadi,

$$\begin{aligned} q_{out, \text{ condensate tank}} &= h_8 - h_1 \\ &= 339,25 - 155,08 \\ &= 184,17 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Untuk menganalisa lebih lanjut maka langkah yang harus dilakukan adalah mengecek seluruh energi yang masuk dan keluar dari sistem yaitu dengan menggunakan kesetimbangan energi yang dituliskan dalam persamaan,

$$\sum e_{in} = \sum e_{out}$$

dimana jumlah energi yang dimasukkan kedalam sistem yaitu

$$\begin{aligned} e_{in} &= q_{in} + w_{in} \\ &= (q_{in, \text{ boiler}} + q_{in, \text{ super heater}}) + (w_{in, \text{ pump}}) \\ &= (2614,965 + 112,8) + (0,755025) \\ &= 2728,52 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

sedangkan jumlah energi yang dikeluarkan dari dalam sistem yaitu

$$\begin{aligned} e_{out} &= q_{out} + w_{out} \\ &= (q_{out, \text{ condenser}} + q_{out, \text{ condensate tank}} + q_{losses 1} + q_{losses 2}) \\ &\quad + (w_{out, \text{ turbine}}) \\ &= (2353,05 + 184,17 + 0,4 + 87,7) + (103,2) \\ &= 2728,52 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

maka dengan menggunakan kesetimbangan energi pada persamaan 4.1,

$$\sum e_{in} = \sum e_{out}$$

$$2728,52 \text{ kJ/kg} = 2728,52 \text{ kJ/kg}$$

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa seluruh energi yang masuk dan keluar dari sistem memiliki nilai yang sama yaitu 2728,52 kJ/kg

### 4.3.2 Efisiensi termal

Efisiensi termal merupakan perbandingan antara energi yang digunakan ( $e_u$ ) yang merupakan energi berupa kerja turbin yang dihasilkan oleh sistem dengan seluruh energi yang dimasukkan kedalam sistem ( $e_{in}$ ) maka efisiensi termalnya menjadi:

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{e_u}{e_{in}} \times 100\% \\ &= \frac{103,2}{2728,52} \times 100\% \\ &= 3,78\% \end{aligned}$$

### 4.3.3 Analisa overall efficiency

Dengan menggunakan persamaan 2.46. maka efisiensi keseluruhan suatu sistem adalah

$$\eta_{overall} = \frac{W_{generator}}{Q_{bahan\ bakar}} \times 100\%$$

dimana kerja yang dihasilkan oleh generator merupakan daya listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem dimana

$$\begin{aligned} W_{generator} &= V \cdot A \\ &= 105 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} \\ &= 420 \text{ VA} \\ &= 0,42 \text{ kW} \end{aligned}$$

sedangkan jumlah energi bahan bakar yang dimasukkan kedalam sistem berasal dari bahan bakar yang digunakan dalam boiler dan superheater, maka dengan menggunakan persamaan 2.48

$$\begin{aligned}
 Q_{bb \text{ boiler}} &= \dot{m}_{bb \text{ boiler}} \times LHV \\
 &= 0,00228 \frac{kg}{s} \times 43124 \text{ kJ/kg} \\
 &= 98,32 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{bb \text{ super heater}} &= \dot{m}_{bb \text{ super heater}} \times LHV \\
 &= 0,000698 \frac{kg}{s} \times 43124 \text{ kJ/kg} \\
 &= 30,1 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Sehingga efisiensi keseluruhan sistem PLTU pada beban maksimum yaitu

$$\begin{aligned}
 \eta_{overall} &= \frac{W_{generator}}{Q_{bb \text{ boiler}} + Q_{bb \text{ super heater}}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,42 \text{ kW}}{98,32 \text{ kW} + 30,1 \text{ kW}} \times 100\% \\
 &= 0,33 \%
 \end{aligned}$$

#### 4.3.4 Analisa diagram fase

Sebuah pembangkit daya uap tidak dapat bekerja dalam keadaan ideal seperti yang digambarkan pada siklus Rankine ideal, sebab ada kenyataannya terdapat penyimpangan dalam siklus Rankine akibat adanya kerugian-kerugian yang terjadi karena:

1. Kerugian didalam *tube*
2. Kerugian didalam *boiler*
3. Kerugian energi didalam turbin
4. Kerugian didalam pompa
5. Kerugian didalam kondenser

Pada siklus Rankine ideal, hal-hal tersebut diabaikan untuk mempermudah proses perhitungan dan analisis energi.

Siklus Rankine aktual pada miniatur PLTU laboratorium Departemen Teknik Mesin FTUI terdiri dari 8 tahapan proses diantaranya yaitu:

- 1-2 Proses kompresi pada pompa
- 2-3 Proses penambahan kalor pada boiler
- 3-4 Proses penurunan tekanan oleh *pressure reducing valve*
- 4-5 Proses pemanasan lanjut pada superheater
- 5-6 Distribusi uap melalui pipa-pipa
- 6-7 Proses ekspansi pada turbin
- 7-8 Proses pelepasan kalor pada kondenser
- 8-1 Proses pencampuran antara kondensat dengan air hasil softener pada *condensate tank*

Proses tersebut didasarkan pada kondisi pada masing-masing titik pengukuran, sehingga didapatkan diagram h-s, p-h dan T-s. Dengan penjelasan proses sebagai berikut :

#### **1-2 Proses kompresi pada pompa**

Pada proses ini air pada kondisi 1 yang memiliki temperatur  $37^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atmosfer akan dimasukkan kedalam boiler dengan menggunakan pompa. Kondisi air setelah keluar pompa pada titik 2 tidak diketahui secara jelas karena tidak adanya alat ukur yang terpasang, sehingga diasumsikan bahwa tekanan air meningkat menjadi 8,5 bara. Tekanan tersebut merupakan tekanan yang diukur pada titik keluar dari boiler dan bukan pada titik keluar dari pompa dimana kondisi yang sebenarnya terjadi. Sedangkan temperaturnya diasumsikan konstan yaitu  $37^{\circ}\text{C}$  atau isothermal. Sehingga kondisi air dapat dikatakan pada kondisi *compressed liquid*. Dalam proses ini terjadi kenaikan nilai entalpi, walaupun kenaikannya sangat kecil.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 terutama pada bagian (c), proses ini tidak terlihat dengan jelas karena selisih entalpi yang terjadi antara titik 1 dan 2 kecil sekali sehingga titik ini berhimpitan. Selisih entalpi antara titik 1 dan 2 yaitu sebesar  $0,755025 \text{ kJ/kg}$  dan nilai ini merupakan kerja pompa yang ditambahkan kedalam sistem. Nilai entropi pada diagram ini juga tidak tampak jelas karena selisih entropinya juga kecil. Sehingga secara keseluruhan diagram h-s tidak memberikan informasi yang jelas tentang proses yang terjadi dari titik 1 ke titik 2.

Pada diagram p-h yang ditunjukkan oleh gambar 4.2, proses ini terlihat dengan jelas karena proses dari titik 1 ke titik 2 merupakan proses kenaikan tekanan dimana tekanan 1 bara pada titik 1 dinaikkan tekanannya menjadi 8,5 bara pada titik 2. Sedangkan pada sumbu aksis yang menunjukkan nilai entalpi membuat garis yang terbentuk dari titik 1 ke titik 2 agak sedikit miring kekanan karena kenaikan nilai entalpi yang kecil.

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, sama halnya pada diagram h-s, proses dari titik 1 ke titik 2 juga tidak tampak dengan jelas. Tetapi yang membedakannya yaitu pada sumbu ordinatnya menunjukkan temperatur. Temperatur pada proses tersebut sebenarnya mengalami kenaikan akan tetapi karena kenaikannya sangat kecil maka dapat diasumsikan bahwa prosesnya adalah isothermal.

### **2-3 Proses penambahan kalor pada boiler**

Pada proses ini air secara bertahap akan berubah fase menjadi uap jenuh (*saturated vapor*) karena adanya penambahan kalor. Pada titik 3, alat ukur yang terpasang hanya *pressure gauge* dan tidak adanya termometer terpasang. Sehingga kondisi setelah keluar dari boiler yaitu dengan tekanan 8,5 bara dan diasumsikan temperaturnya merupakan temperatur saturasi. Dalam proses ini terjadi kenaikan nilai entalpi yang besar karena perubahan fase yang terjadi.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, proses akan terlihat dengan jelas karena kenaikan nilai entalpi sangat signifikan. Selisih entalpi antara titik 2 dan 3 yaitu sebesar 2614,965 kJ/kg dan nilai ini merupakan kalor yang ditambahkan oleh boiler ke dalam sistem. Garis proses naik dengan tekanan yang konstan dan disertai dengan penambahan nilai entropi. Nilai entropi pada diagram ini naik karena terjadi perubahan fase dari fluida yaitu dari cair tekan (*compressed liquid*) menjadi uap jenuh (*saturated vapor*). Selisih nilai entropinya yaitu sebesar 6,109 kJ/kg.K.

Pada diagram p-h yang ditunjukkan oleh gambar 4.2, proses ini dengan jelas memperlihatkan garis tekanan konstan yang lurus pada arah horizontal. Dari titik 2, seiring dengan penambahan kalor maka cairan akan

mencapai garis cair jenuh (*saturated liquid*), kalor yang ditambahkan untuk mencapai titik ini adalah kalor sensibel. Kalor sensibel adalah kalor yang diberikan atau diserap oleh suatu zat yang menyebabkan terjadinya perubahan temperatur tanpa disertai dengan terjadinya perubahan fase. Kalor ini dinotasikan dengan  $q_s$  dalam unit massa. Kalor sensibel dapat diketahui pada diagram ini yaitu dengan menentukan selisih antara entalpi pada titik 2 dan entalpi pada titik perpotongan garis proses dengan garis cair jenuh. Sehingga kalor sensibelnya yaitu sebesar

$$\begin{aligned} q_s &= 731,95 - 155,835 \\ &= 576,115 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kemudian dari titik perpotongan tersebut, garis proses kemudian menuju ketitik 3 dan selama proses ini berlangsung kalor juga terus ditambahkan, kalor ini dinamakan kalor laten. Kalor laten adalah kalor yang diberikan atau diserap oleh suatu zat yang menyebabkan terjadinya perubahan fase tanpa disertai dengan terjadinya perubahan temperatur. Kalor ini dinotasikan dengan  $q_L$  dalam unit massa. Kalor laten dapat diketahui pada diagram ini yaitu dengan menentukan selisih antara entalpi pada titik 3 dan entalpi pada titik perpotongan garis proses dengan garis cair jenuh. Sehingga kalor laten penguapannya yaitu sebesar

$$\begin{aligned} q_L &= 2770,8 - 731,95 \\ &= 2038,85 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, diagram ini lebih menunjukkan proses perubahan fase yang terjadi yang telah dijelaskan secara lebih rinci pada subbab 2.2. perbedaannya hanya terletak pada tekanannya saja yang menyebabkan temperatur saturasinya juga berbeda, tetapi secara proses hampir sama. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, entropi pada proses ini mengalami kenaikan yang besar. Karena perubahan fase yang terjadi membuat ketidakteraturan partikel dari fluida menjadi besar. Dilihat dari sisi molekul, molekul air yang masih berbentuk cair memiliki jarak antar molekul yang lebih rapat bila dibandingkan dengan molekul air yang berbentuk uap. Sehingga gerakan dari molekul menjadi lebih bebas dan tidak beraturan, hal inilah yang menyebabkan nilai entropi

mengalami kenaikan yang besar. Dari persamaan 2.39 juga dapat dijelaskan mengapa nilai entropi mengalami kenaikan, yaitu

$$(\delta Q)_{int\ rev} = T dS$$

Pada saat perubahan fase nilai temperatur tetap dan kalor terus ditambahkan maka nilai perubahan entropinya juga akan semakin bertambah besar.

### 3-4 Proses penurunan tekanan oleh *pressure reducing valve*

Pada proses ini tekanan uap setelah keluar dari boiler akan diturunkan oleh *pressure reducing valve*, hal ini dilakukan untuk mengontrol tekanan operasi dari PLTU. Sehingga pada titik 4 tekanan turun menjadi 7 bara dan dengan temperatur 168 °C, titik ini merupakan titik dimana uap akan mulai memasuki *superheater* untuk dipanaskan kembali.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, selisih entalpi antara titik 3 dan 4 yaitu sebesar 0,4 kJ/kg dan nilai ini merupakan losses yang dinotasikan pada pembahasan sebelumnya dengan  $q_{losses\ 1}$ . Hal ini juga ditunjukkan dengan jelas pada garis proses yang sedikit agak turun. Tetapi nilai entropi yang tampak pada diagram ini mengalami sedikit kenaikan.

Karena proses dari titik 3 ke titik 4 merupakan penurunan tekanan maka pada diagram p-h tampak jelas penurunan tekanannya yaitu sebesar 1,5 bar. Garis prosesnya menurun vertikal dengan kemiringan kearah kiri karena sedikit penurunan entalpi.

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, selain proses penurunan tekanan maka pada grafik ini juga akan terlihat penurunan temperatur sebesar 5°C.

### 4-5 Proses pemanasan lanjut oleh *superheater*

Pada proses ini uap akan dipanaskan kembali sehingga dihasilkan uap panas lanjut (*superheated vapor*). Hal ini dilakukan agar dihasilkan uap yang kering sehingga tidak merusak sudu turbin, karena jika uap masih dalam kondisi basah maka akan merusak sudu turbin. Selain itu tujuan dari

pemanasan lanjut ini yaitu untuk menaikkan nilai energi dari uap berupa entalpi. Tekanan pada saat proses pemanasan lanjut ini akan menurun akibat kerugian-kerugian yang terjadi didalam pipa yaitu menjadi 6 bara tetapi dengan kenaikan temperatur hingga menjadi 215°C.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, proses akan terlihat dengan jelas karena kenaikan nilai entalpi kembali terjadi yang ditandai dengan naiknya garis proses. Selisih entalpi antara titik 4 dan 5 yaitu sebesar 112,8 kJ/kg dan nilai ini merupakan kalor yang ditambahkan oleh *superheater* kedalam sistem. Tekanan turun selama proses selain itu disertai juga dengan penambahan nilai entropi sebesar 0,3 kJ/kg.K.

Karena proses dari titik 4 ke titik 5 mengalami penurunan tekanan sebesar 1 bar maka pada diagram p-h tampak garis prosesnya menurun dengan kemiringan kearah kanan karena adanya kenaikan nilai entalpi.

Jika kita melihat diagram T-s maka yang akan terlihat jelas adalah kenaikan temperatur yang cukup besar yaitu sebesar 47°C. Kenaikan temperatur ini akan berbanding lurus dengan kenaikan nilai kalor yang ditambahkan oleh superheater selama proses berlangsung.

#### **5-6 Distribusi uap melalui pipa-pipa**

Pada proses ini uap akan dialirkan dari titik keluar superheater melalui suatu pemipaan hingga mencapai titik masuk turbin. Dalam proses ini, terjadi penurunan tekanan dan temperatur. Hal ini disebabkan karena kerugian-kerugian yang terjadi didalam pipa, kerugian ini berupa adanya gesekan antar fluida, panjang pipa, adanya elbow dan sambungan T, adanya alat ukur yang terpasang, valve dan kerugian kalor akibat adanya pelepasan kalor ke lingkungan sekitar. Sehingga pada titik 6 atau titik dimana uap akan masuk turbin, tekanan dan temperaturnya turun menjadi 5,2 bara dan 173°C.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, selisih entalpi antara titik 5 dan 6 yaitu sebesar 87,7 kJ/kg dan nilai ini merupakan losses yang dinotasikan pada pembahasan sebelumnya dengan  $q_{losses 2}$ . Garis proses turun dan nilai entropi yang tampak pada diagram ini mengalami sedikit penurunan.

Sama halnya dengan proses dari titik 3 ke titik 4 maka pada proses dari titik 5 ke titik 6 terjadi juga penurunan tekanan dan pada diagram p-h tampak penurunan tekanannya yaitu sebesar 1 bar. Garis prosesnya menurun vertikal dengan kemiringan ke arah kiri karena sedikit penurunan entalpi.

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, selain proses penurunan tekanan maka pada grafik ini juga akan terlihat penurunan temperatur. Setelah mengalami kenaikan temperatur pada proses 4-5 sebesar 47 °C maka pada proses 5-6 temperatur turun lagi sebesar 42 °C. Jadi energi yang diberikan oleh *superheater* sebesar 112,8 kJ/kg maka sebesar 87 kJ/kg atau sekitar 77%-nya digunakan untuk mendistribusikan uap untuk menuju ke turbin.

#### **6-7 Proses ekspansi pada turbin**

Uap *superheated* pada kondisi 6 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Energi uap berupa energi potensial (energi tekanan) dan energi kalor akan dikonversikan oleh turbin menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Tekanan dan temperatur dari uap akan turun selama proses ini menuju ke titik 7 menjadi 1 bar dan 108 °C dimana uap akan masuk kondenser. Pada titik ini kondisi uap masih dalam keadaan *superheat*.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, proses akan terlihat dengan jelas karena penurunan nilai entalpi cukup besar. Selisih entalpi antara titik 6 dan 7 yaitu sebesar 103,2 kJ/kg dan nilai ini merupakan kerja yang dilakukan oleh turbin. Definisi dari kerja ini telah dijelaskan juga pada subbab 2.5.2. dimana kerja ini dinamakan kerja aliran yaitu kerja untuk memutar turbin tersebut.

Garis proses akan turun dengan penambahan nilai entropi. Dalam sebuah proses reversible, hubungan antara entropi dan kalor adalah seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2.39.

$$(\delta Q)_{int rev} = T dS$$

Pada kasus didalam turbin, jika kita menggunakan persamaan diatas dimana energi kalor pada uap berkurang dan temperaturnya juga menurun maka kemungkinannya bahwa perubahan entropi yang terjadi adalah tetap atau berkurang juga. Hal ini terjadi apabila proses yang terjadi adalah reversibel internal. Tetapi pada kenyataannya perubahan entropi yang terjadi yaitu 0,4926 kJ/kg.K pada arah yang positif artinya entropi bertambah. Karena pada kondisi aktual yang terjadi adalah proses ireversibel sehingga persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.40 dimana

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev} + dS'$$

di mana  $dS'$  adalah perubahan entropi akibat keacakan dari sebuah sistem, dan nilainya selalu lebih dari nol.

Total kalor yang diubah menjadi energi putaran poros dan kalor yang dikeluarkan oleh uap, adalah nol. Tapi kita tahu bahwa perubahan entropi dalam sistem ini pasti positif, karena proses tersebut tidak bisa kita putar balik. Perubahan entropi yang positif ini murni disebabkan oleh bertambahnya derajat keacakan dari partikel-partikel uap ketika proses konversi energi terjadi. Ini mengakibatkan nilai  $dS' > 0$ , sehingga kita katakan bahwa entropi total dari sistem ini bertambah.

Pada diagram p-h yang ditunjukkan oleh gambar 4.2, proses ini dengan jelas memperlihatkan garis tekanan arah vertikal kebawah, artinya terjadi penurunan tekanan. Penurunan tekanan yang terjadi yaitu sebesar 4,2 bar. Dan garisnya juga miring kearah kiri akibat dari penurunan nilai entalpi.

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, selain proses penurunan tekanan maka pada grafik ini juga akan terlihat penurunan temperatur sebesar 65°C.

### 7-8 Proses pelepasan kalor pada kondenser

Uap yang keluar dari turbin masih dalam keadaan *superheat* yang kemudian akan dialirkan menuju ke kondenser. Kondenser adalah suatu perangkat yang digunakan untuk mengkondensasikan uap yang keluar dari

exhaust turbin uap dengan pendinginan yang diperoleh dari air yang disirkulasikan didalam kondenser. Kalor yang dilepaskan oleh uap didalam kondenser akan sebanding dengan kalor yang diterima oleh air yang disirkulasikan. Uap didalam kondenser akan mengalami kondensasi yang kemudian keluar dari kondenser dalam bentuk air panas yang disebut kondensat. Temperatur air kondensat yang keluar dari kondenser yaitu  $81^{\circ}\text{C}$ . Selanjutnya kondensat ini akan ditampung didalam *condensate tank* untuk digunakan kembali sebagai *feed water* atau air pengumpan.

Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, proses akan terlihat dengan jelas karena penurunan nilai entalpi sangat signifikan. Selisih entalpi antara titik 7 dan 8 yaitu sebesar  $2353,05 \text{ kJ/kg}$  dan nilai ini merupakan kalor yang lepas oleh kondenser dari dalam sistem. Garis proses turun dengan tekanan yang konstan dan disertai dengan penurunan nilai entropi. Penurunan nilai entropi ini karena melihat dari sisi uap yang terkondensasi saja tetapi jika kita melihat pada air yang digunakan sebagai media pendinginan maka nilai entropinya akan bertambah.

Total kalor yang diterima air pendingin dan kalor yang dikeluarkan oleh uap, adalah nol. Tapi kita tahu bahwa perubahan entropi dalam sistem ini pasti positif, karena proses tersebut tidak bisa kita putar balik. Perubahan entropi yang positif ini murni disebabkan oleh bertambahnya derajat keacakan dari partikel-partikel air pendingin dan uap ketika ada pertukaran kalor di antara keduanya. Ini mengakibatkan nilai  $dS' > 0$ , sehingga kita katakan bahwa entropi total dari sistem ini bertambah.

Pada diagram p-h yang ditunjukkan oleh gambar 4.2, proses ini dengan jelas memperlihatkan garis tekanan konstan yang lurus pada arah horizontal. Dari titik 7, seiring dengan berkurangnya kalor maka uap panas lanjut akan mencapai garis uap jenuh (*saturated vapor*). Kemudian garis ini akan terus bergerak kearah kiri dengan disertai perubahan fase yaitu pada kondisi cair jenuh tepat pada garis cair jenuh, lalu berubah menjadi cair tekan setelah keluar dari kondenser pada titik 8.

Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, diagram memperlihatkan penurunan temperatur sebesar  $71^{\circ}\text{C}$ .

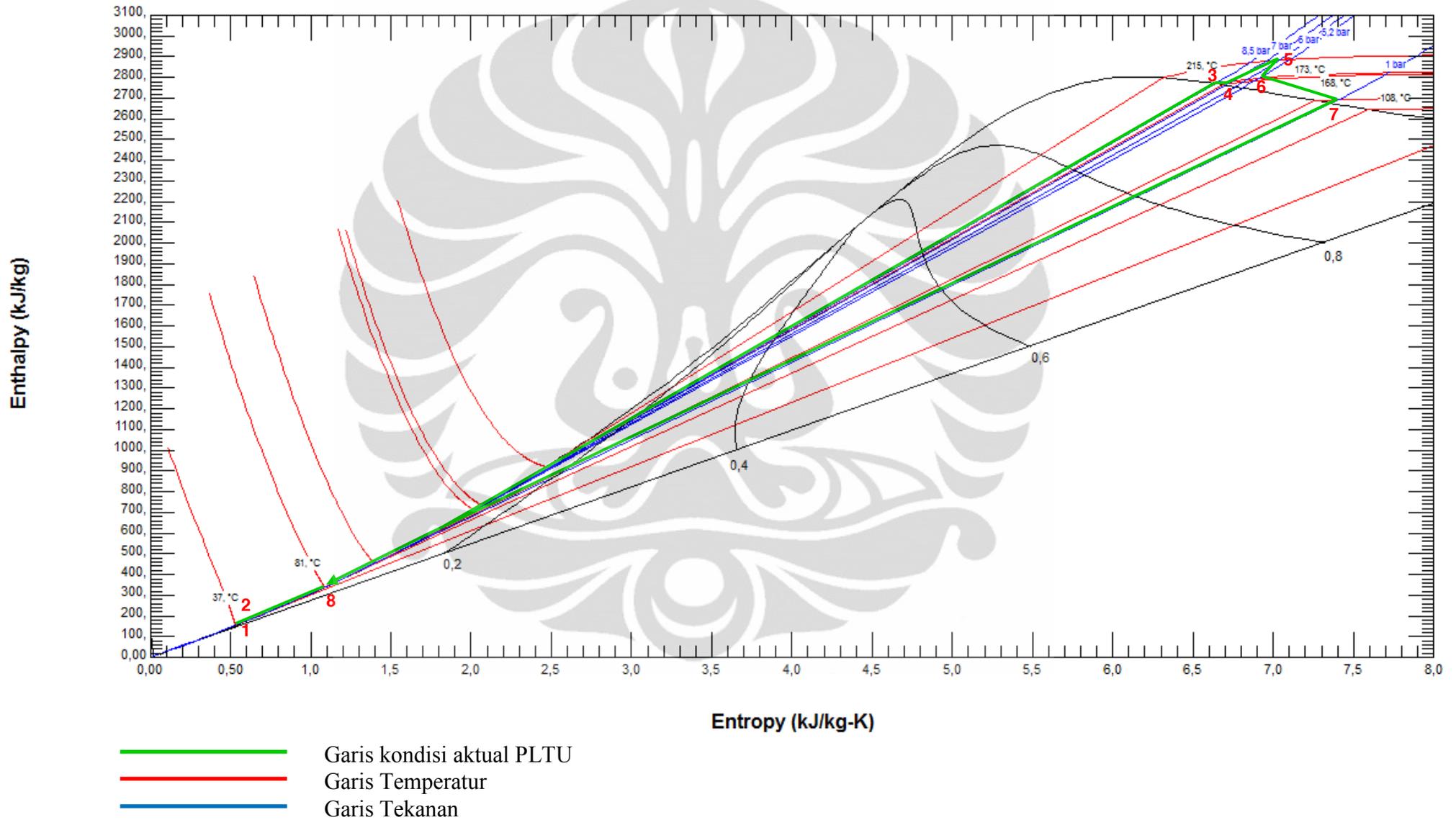
### 8-1 Proses pencampuran antara kondensat dengan air hasil softener pada *condensate tank*

Kondensat yang keluar dari kondenser akan mengalir menuju *condensate tank* yang kemudian akan bercampur dengan air hasil softener. Pencampuran ini menyebabkan temperatur air yang akan diumpungkan ke dalam boiler akan turun menjadi 37 °C. Akan tetapi jika PLTU dioperasikan dalam jangka waktu yang lama maka temperatur tersebut nantinya akan mencapai kesetimbangan.

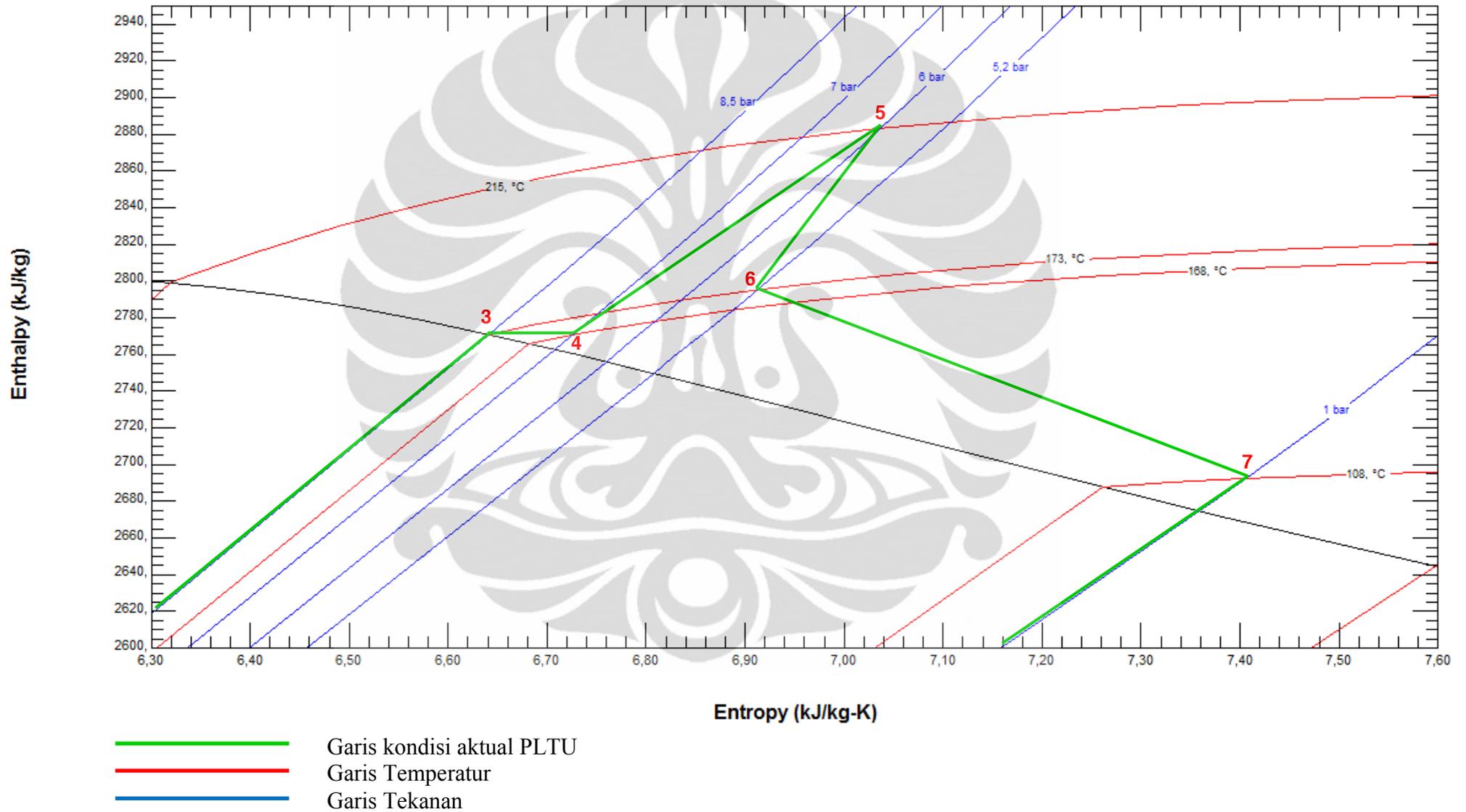
Pada diagram h-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, selisih entalpi antara titik 8 dan 1 yaitu sebesar 184,17 kJ/kg dan nilai ini merupakan losses yang dinotasikan pada pembahasan sebelumnya dengan  $q_{condensate\ tank}$ . Hal ini juga ditunjukkan dengan jelas pada garis proses yang turun dan tampak jelas pada gambar 4.1(c). Tetapi nilai entropi yang tampak pada diagram ini mengalami penurunan atau berkurang. Seperti telah dijelaskan sebelumnya penurunan nilai entropi ini kita lihat dari sisi air kondensat tetapi jika kita melihat secara keseluruhan sistem maka terjadi penambahan entropi pada air yang bercampur dengan hasil kondensasi.

Proses dari titik 8 ke titik 1 merupakan proses yang berlangsung pada kondisi tekanan konstan, maka pada diagram p-h tampak jelas garis lurus horizontal.

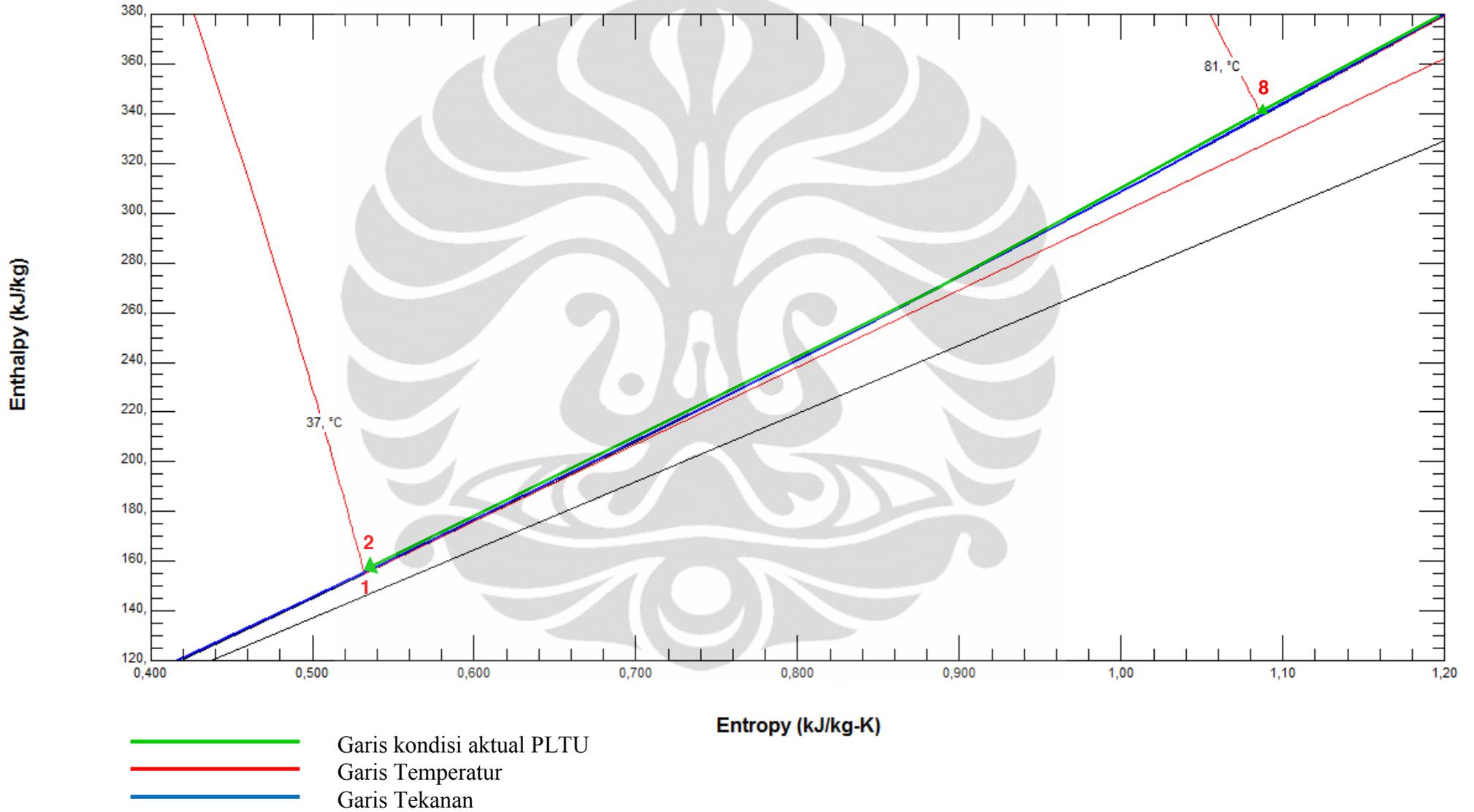
Pada diagram T-s yang ditunjukkan oleh gambar 4.3, diagram memperlihatkan penurunan temperatur sebesar 44°C.



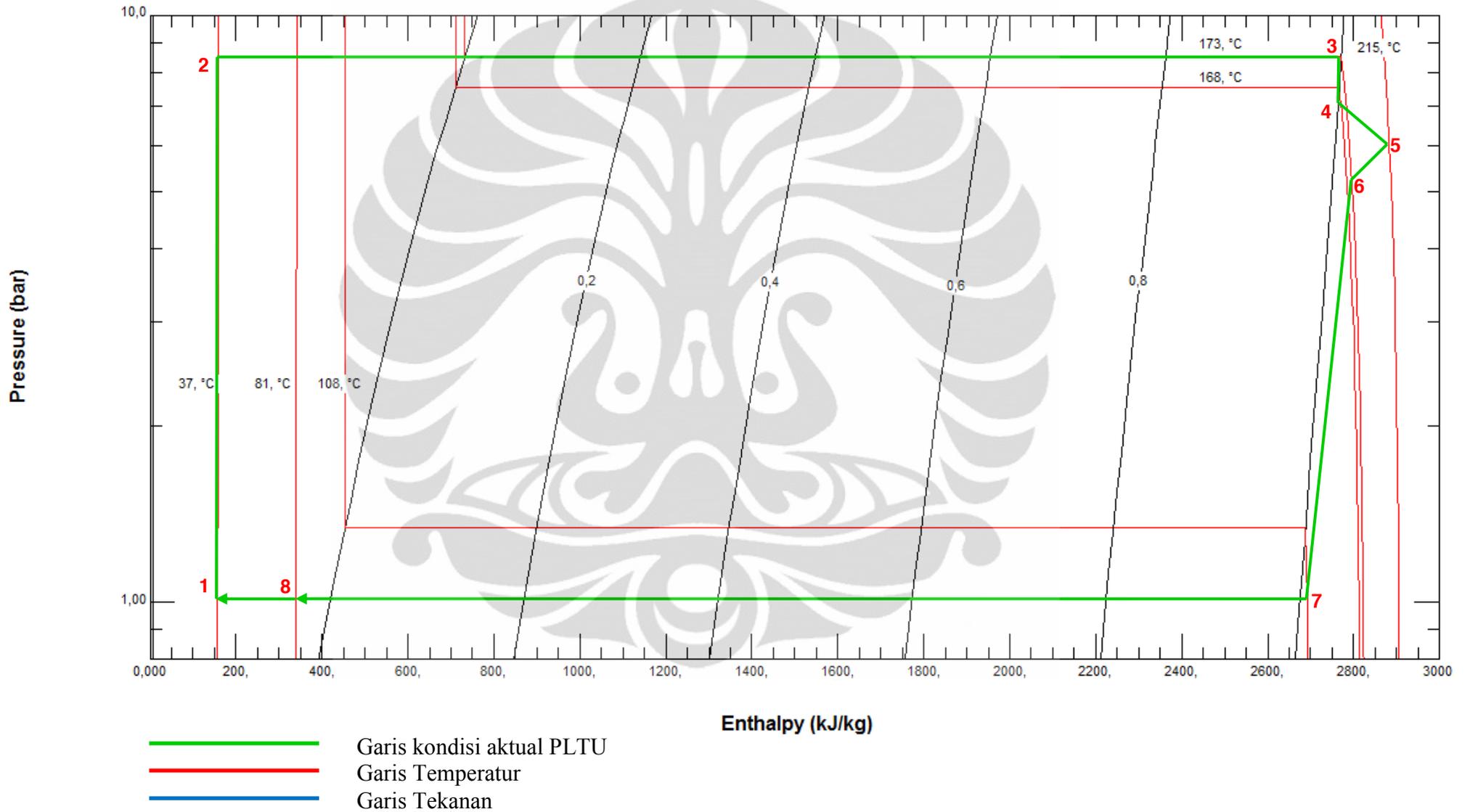
Gambar 4.1.(a) Diagram h-s aktual



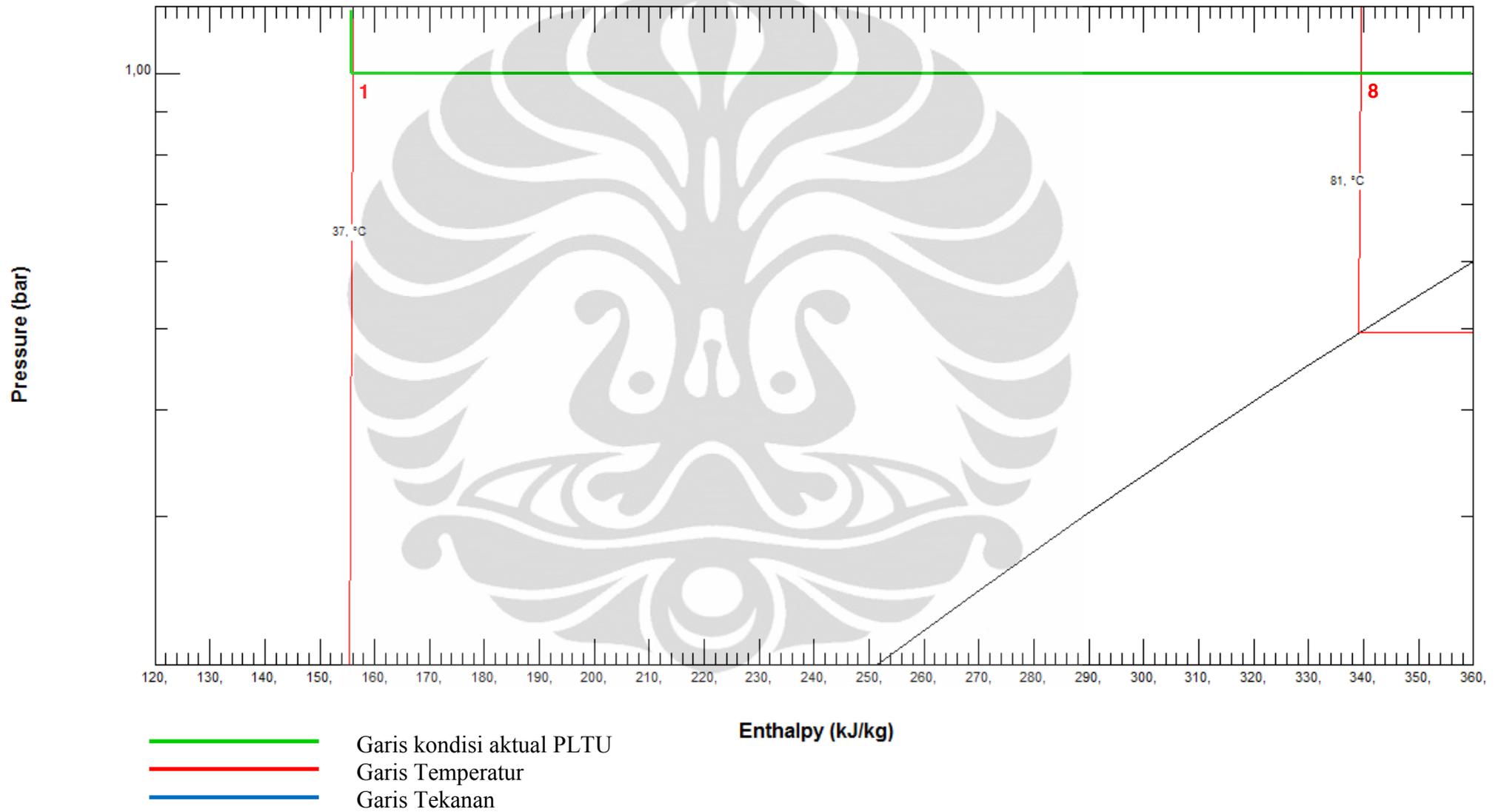
Gambar 4.1.(b) Diagram h-s aktual pada *superheated vapor*



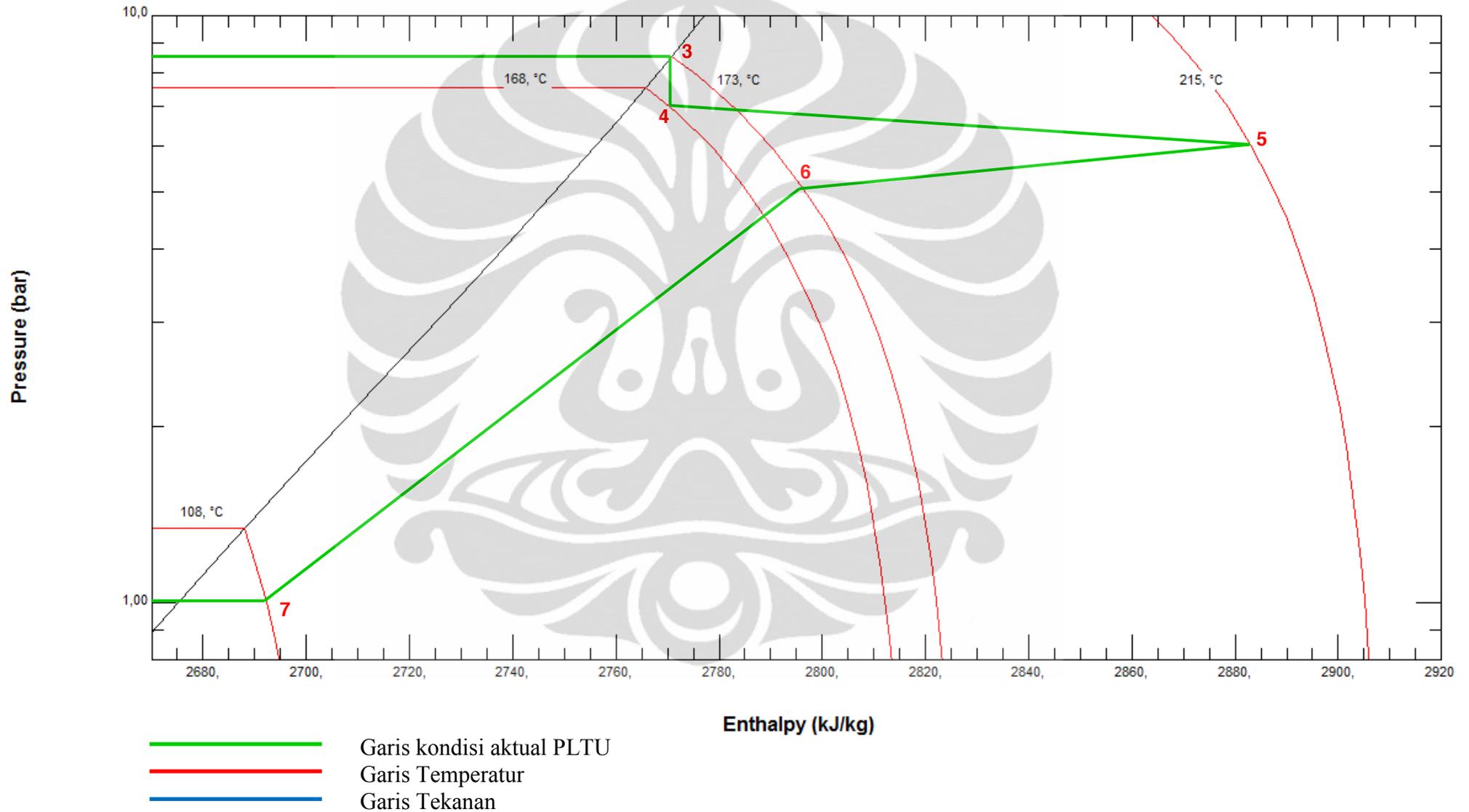
Gambar 4.1.(c) Diagram h-s aktual pada *saturated water*



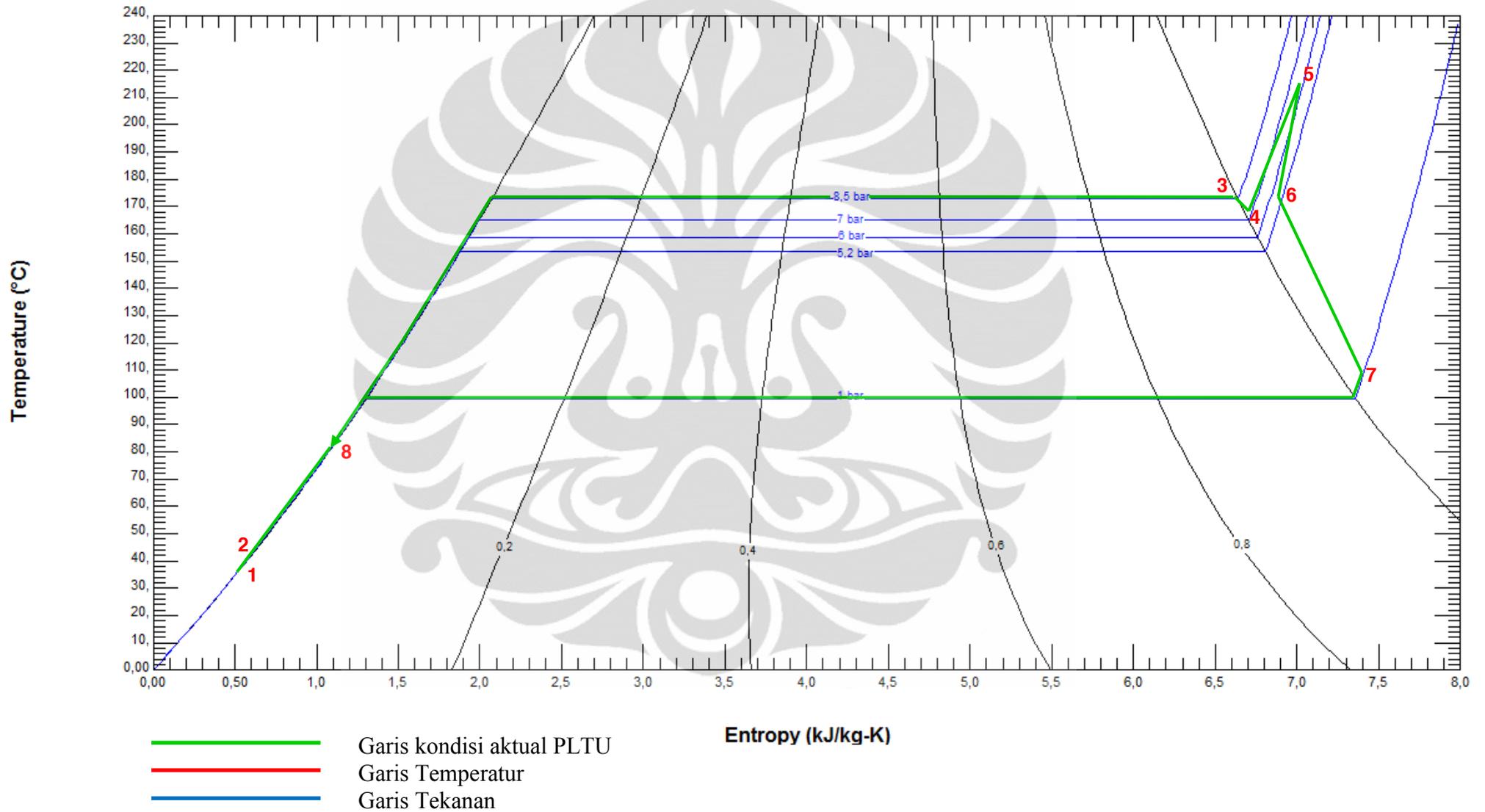
Gambar 4.2.(a) Diagram p-h aktual



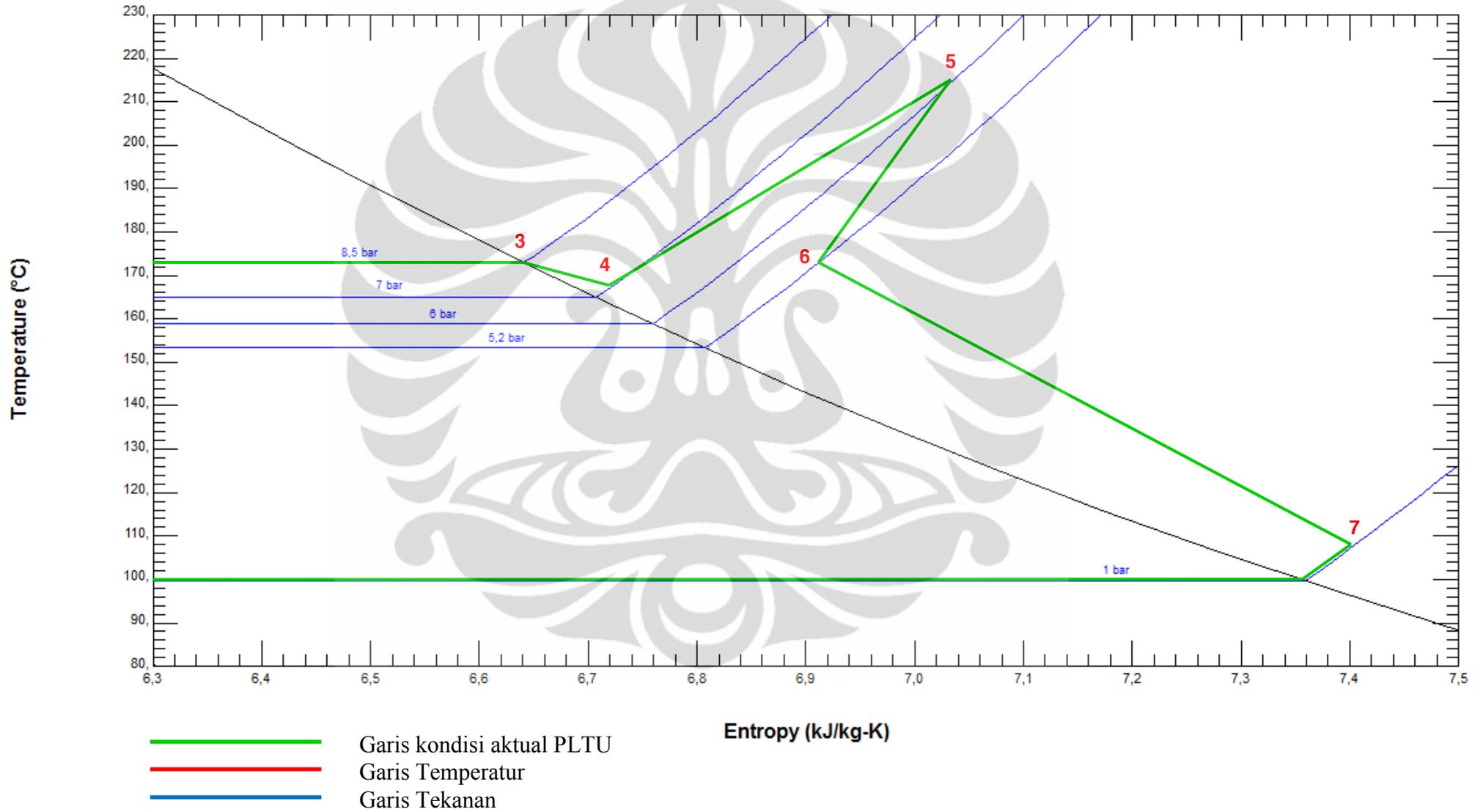
Gambar 4.2.(b) Diagram p-h aktual pada *saturated water*



Gambar 4.2.(c) Diagram p-h aktual pada *superheated vapor*



Gambar 4.3.(a) Diagram T-s aktual



Gambar 4.3.(b) Diagram T-s aktual pada *superheated vapor*

#### 4.3.5 Analisa perbandingan siklus ideal dan siklus aktual

Pada kondisi aktual terjadi beberapa penyimpangan nilai energi yang menyebabkan kerugian pada sistem, tetapi pada kondisi ideal seperti telah dijelaskan pada sub bab 2.8 tentang siklus ideal turbin uap memiliki idealisasi berupa kondisi isobar dan isentropis. Pada keadaan ideal ini maka seluruh kondisi dikembalikan pada desain awal suatu PLTU, seperti dijelaskan dibawah ini,

##### 1-2 Kompresi isentropik oleh pompa.

Fluida pada kondisi 1 masih dalam fase cair yang memiliki tekanan 1 bar kemudian akan dimasukkan kedalam boiler dengan menggunakan pompa sehingga tekanannya meningkat menjadi 8,5 bar. Proses ini terjadi secara isentropis dimana nilai entropi yang terjadi nilainya tetap.

##### 2-3 Penambahan panas dalam boiler secara isobar.

Setelah fluida masuk kedalam boiler dengan tekanan 8,5 bar maka selanjutnya terjadi proses penambahan kalor oleh boiler sehingga terjadi perubahan fase dari air menjadi uap dan temperaturnya meningkat menjadi 215 °C pada titik 3. Proses penambahan kalor ini berlangsung secara isobar dimana nilai tekanannya tetap.

##### 3-4 Ekspansi isentropik pada turbin.

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.

##### 4-1 Pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isothermal.

Campuran uap yang keluar dari turbin kemudian akan dikondensasikan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini. Proses ini berlangsung pada kondisi isobar yaitu pada tekanan 1 bar dan isothermal yaitu pada temperatur saturasi pada tekanan 1 bar.

Pada gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 proses-proses diatas digambarkan dalam diagram h-s, p-h, dan T-s. Selain itu dibandingkan juga siklus ideal dan siklus aktual yang terjadi pada sistem PLTU 450 Watt ini. Dimana nilai-nilai energi pada masing masing titik dijelaskan dibawah ini,

Pada kondisi 1

$P_1 = 1 \text{ bar}$  (saturated liquid)

$$h_{1s} = h_{f@1\text{bar}} = 417,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{g@1\text{bar}} = 2674,9 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{f@1\text{bar}} = 1,3028 \text{ kJ/kg.K}$$

$$s_{g@1\text{bar}} = 7,3588 \text{ kJ/kg.K}$$

$$v_{1s} = v_{f@1\text{bar}} = 0,0010432 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Pada kondisi 2

$P_2 = 8,5 \text{ bar}$

$$s_{2s} = s_{1s}$$

$$w_{\text{pump,in}} = v_1(P_2 - P_1) = (0,0010432 \text{ m}^3/\text{kg})(850 \text{ kPa} - 100 \text{ kPa}) = 0,7824 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = h_{1s} + w_{\text{pump,in}} = 417,5 \text{ kJ/kg} + 0,7824 \text{ kJ/kg} = 418,2824 \text{ kJ/kg}$$

Pada kondisi 3

$P_2 = 8,5 \text{ bar}$

$T_3 = 215 \text{ }^\circ\text{C}$

$$h_{3s} = 2871,3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{3s} = 6,8566 \text{ kJ/kg.K}$$

Pada kondisi 4

$P_4 = 1 \text{ bar}$  (saturated mixture)

$$s_4 = s_3$$

$$x_4 = \frac{s_{4s} - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,8566 - 1,3028}{7,3588 - 1,3028} = 0,917$$

$$\begin{aligned} h_{4s} &= h_f + x_4 h_{fg} = 417,5 \text{ kJ/kg} + 0,917 (2674,9 - 417,5) \text{ kJ/kg} \\ &= 2487,5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Jadi

$$q_{in} = h_{3s} - h_{2s} = (2871,3 - 418,2824) \text{ kJ/kg} = 2453,02 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{out} = h_{4s} - h_{1s} = (2487,5 - 417,5) \text{ kJ/kg} = 2070 \text{ kJ/kg}$$

dan

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \times 100\% = 1 - \frac{2070}{2453,02} \times 100\% = 15,6\%$$

daya yang dihasilkan turbin pada kondisi isentropis yaitu

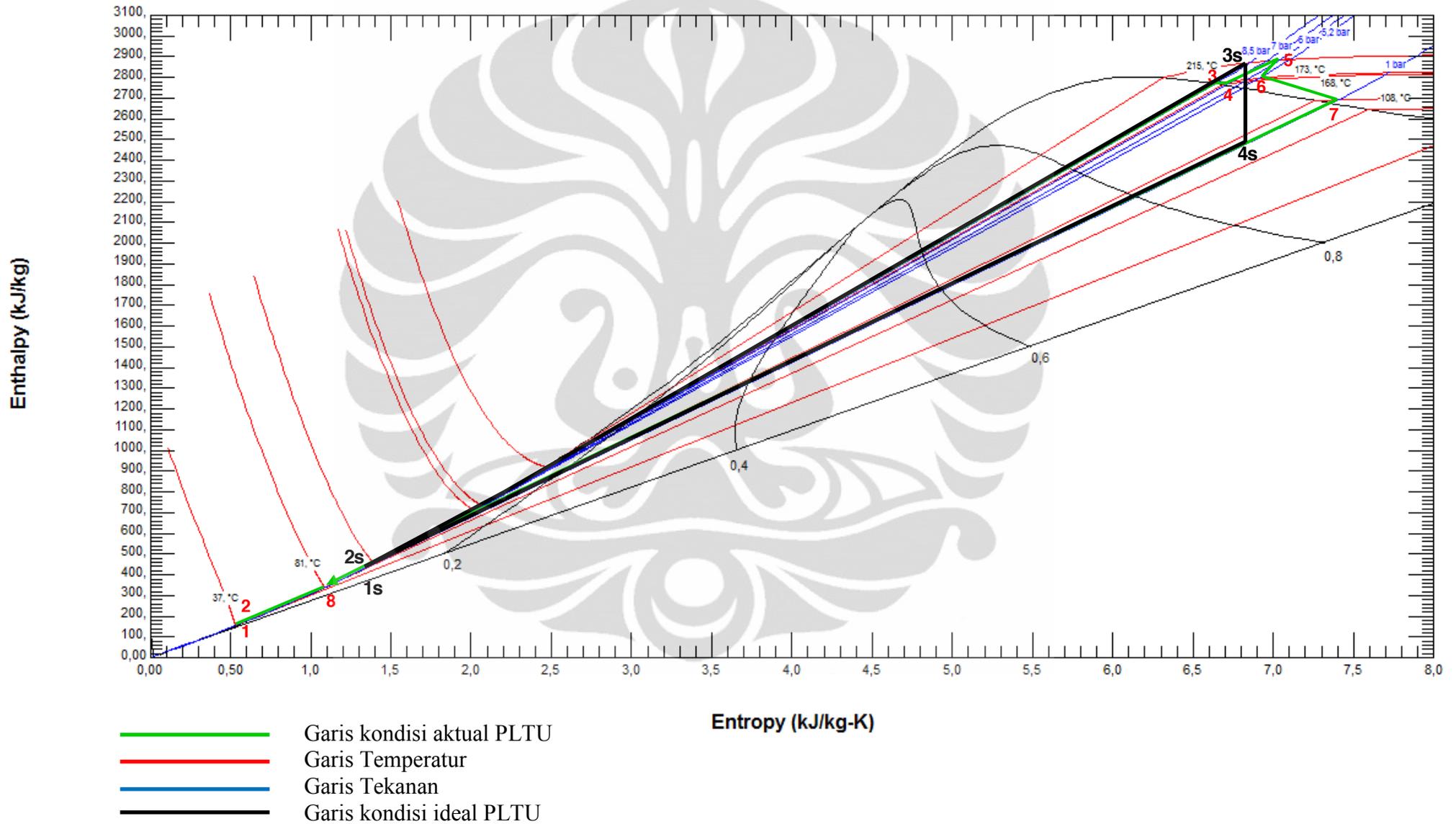
$$\begin{aligned} W_{ts} &= \dot{m}(h_{3s} - h_{4s}) \\ &= 0,023 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (2871,3 - 2487,5) \text{ kJ/kg} \\ &= 8,83 \text{ kW} \end{aligned}$$

sedangkan daya yang dihasilkan oleh turbin pada kondisi aktual yaitu

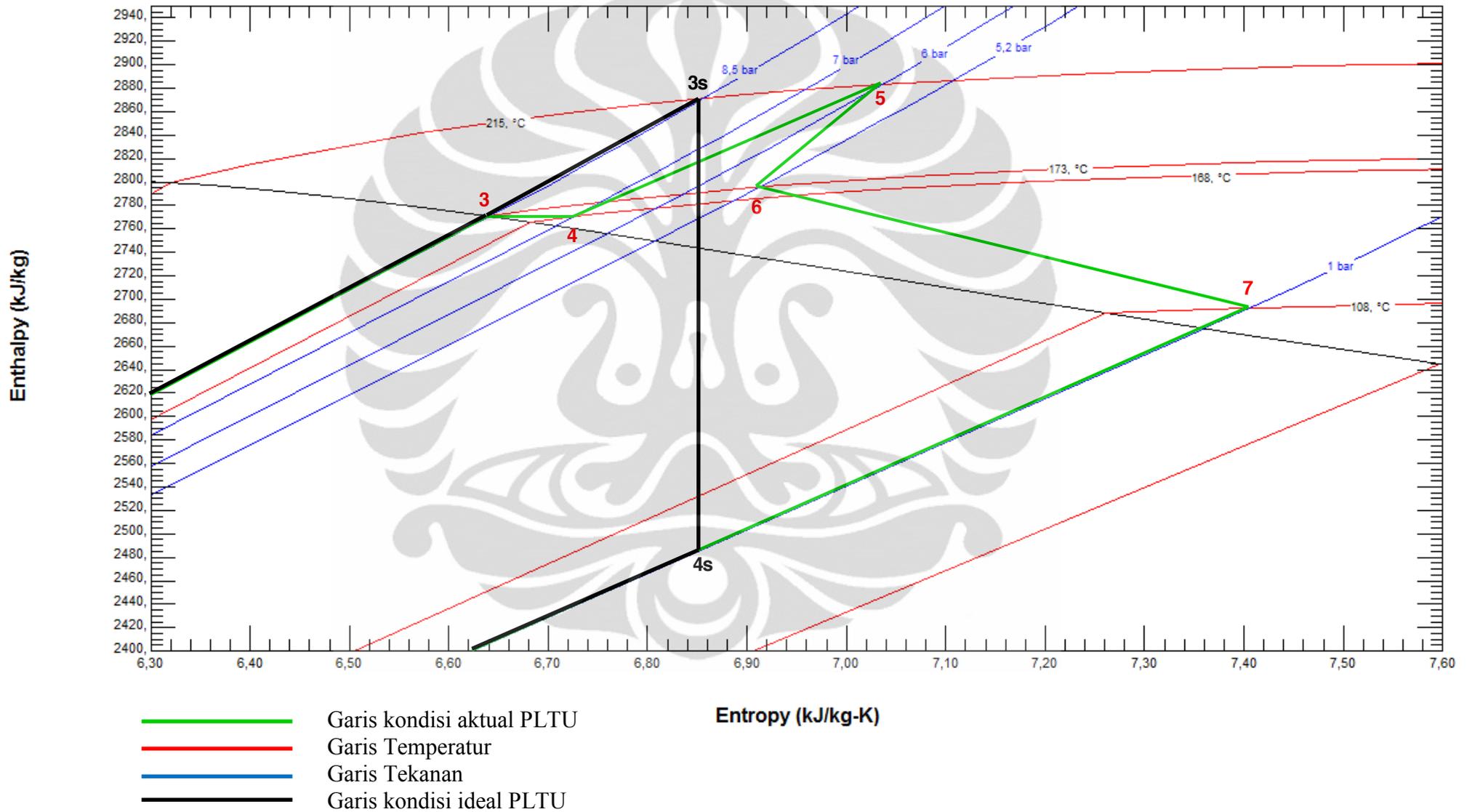
$$\begin{aligned} W_t &= \dot{m}(h_6 - h_7) \\ &= 0,023 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (2795,5 - 2692,3) \text{ kJ/kg} \\ &= 2,37 \text{ kW} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai efisiensi turbin,

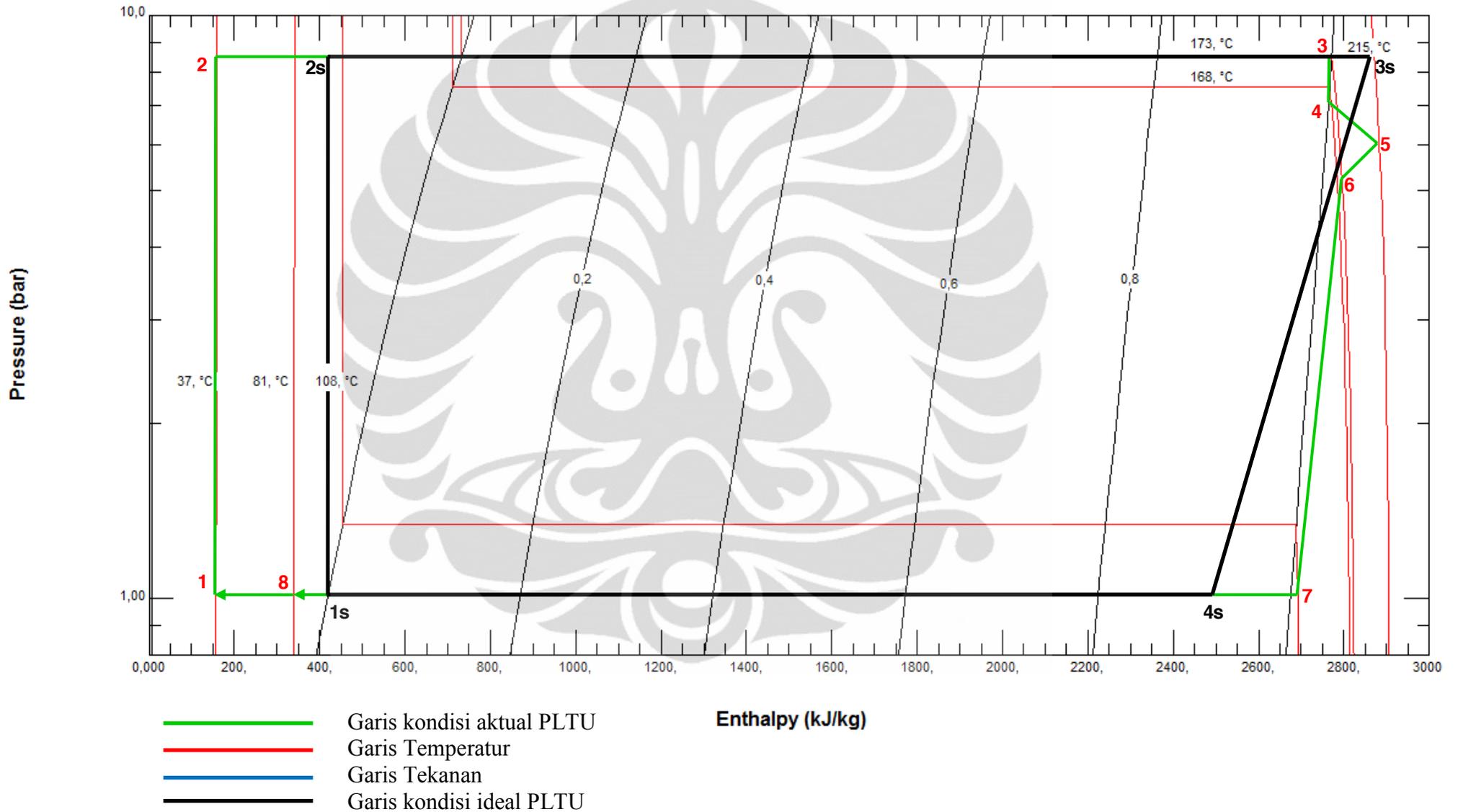
$$\eta_{turbin} = \frac{W_t}{W_{ts}} \times 100\% = \frac{2,37}{8,83} \times 100\% = 0,2684 \text{ atau } 26,84\%$$



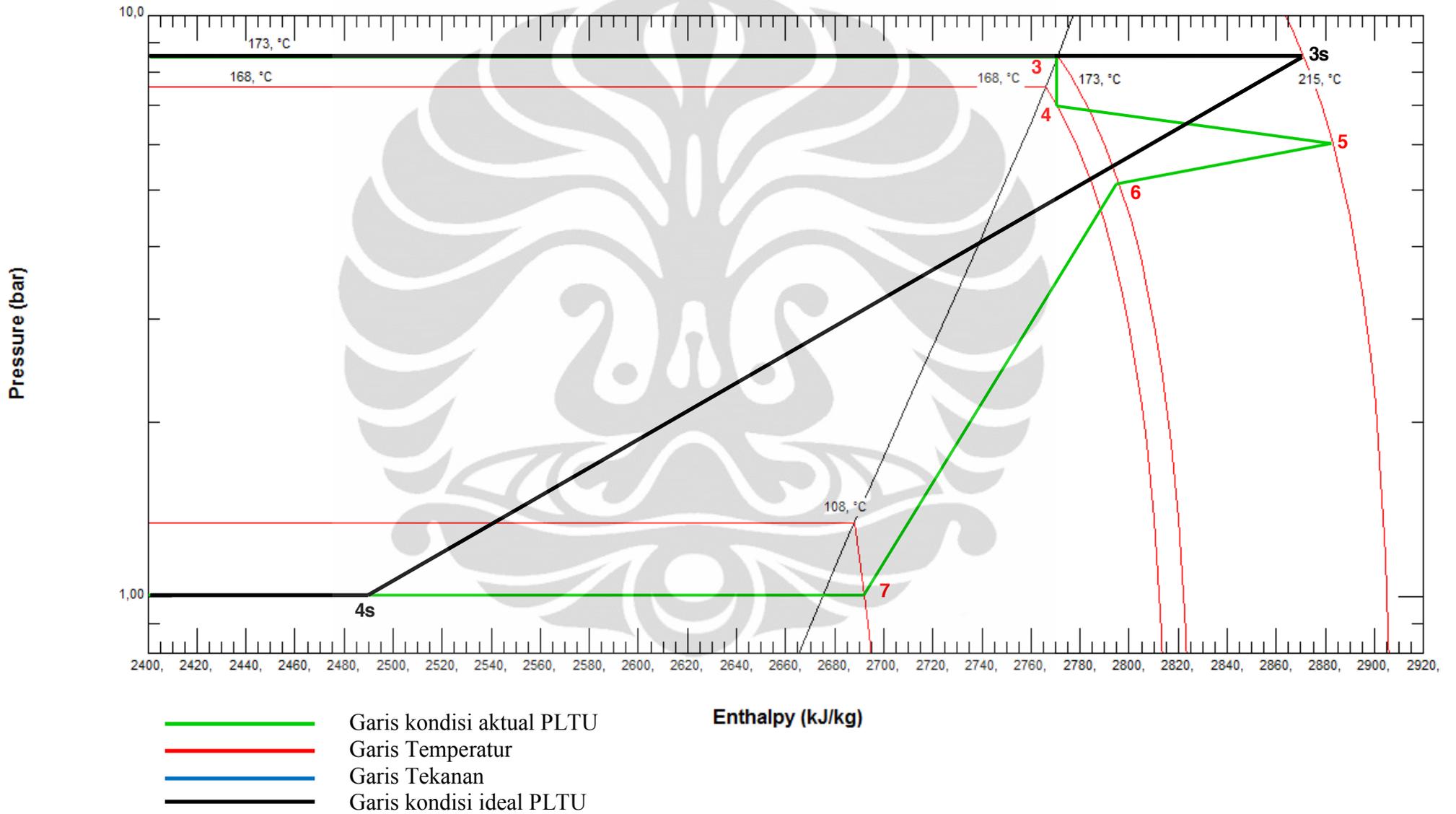
Gambar 4.4.(a) Perbandingan diagram h-s aktual dan ideal



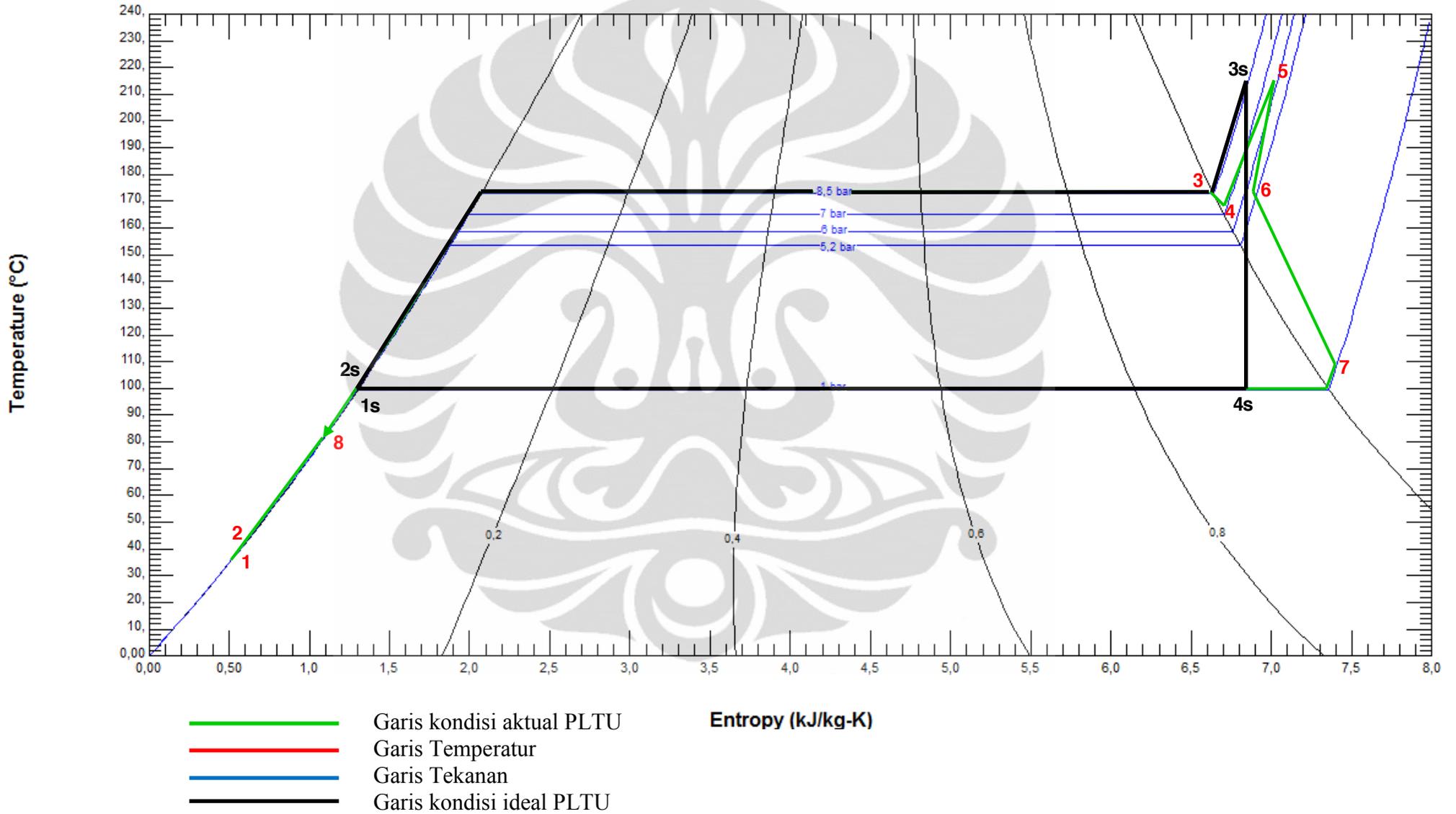
Gambar 4.4.(b) Perbandingan diagram h-s aktual dan ideal pada *superheated vapor*



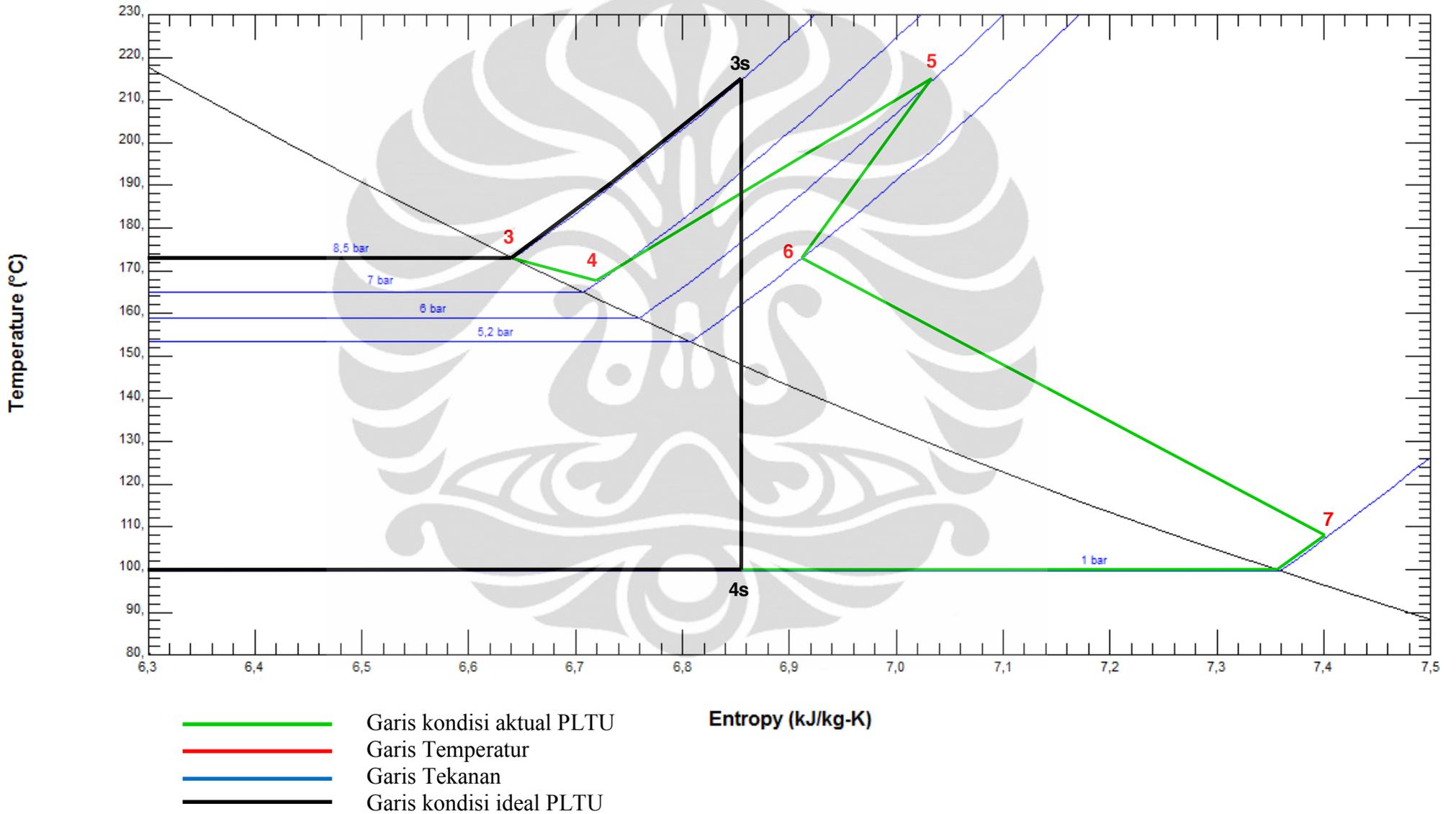
Gambar 4.5.(a) Perbandingan diagram p-h aktual dan ideal



Gambar 4.5.(b) Perbandingan diagram p-h aktual dan ideal pada *superheated vapor*



Gambar 4.6.(a) Perbandingan diagram T-s aktual dan ideal

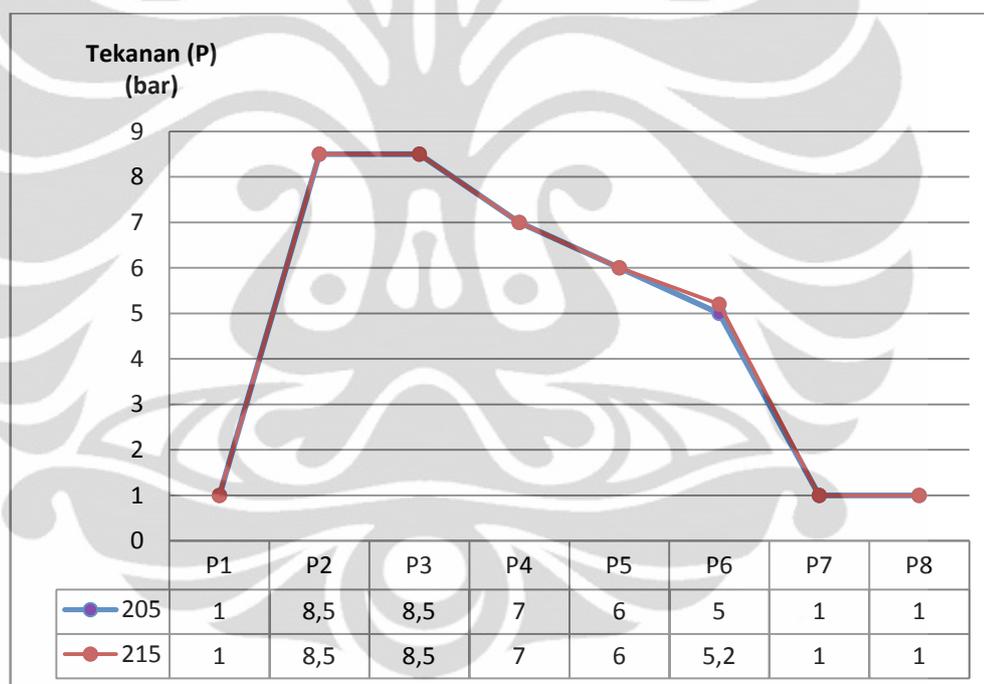


Gambar 4.6.(b) Perbandingan diagram T-s aktual pada *superheated vapor*

### 4.3.6 Analisa perbandingan dua kondisi

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan tentang analisa energi dan diagram fase yang terjadi, maka pada pembahasan kali ini akan dilakukan perbandingan antara kondisi PLTU pada saat superheater diatur pada temperatur 205 °C dengan kondisi PLTU pada saat superheater diatur pada temperatur 215°C.

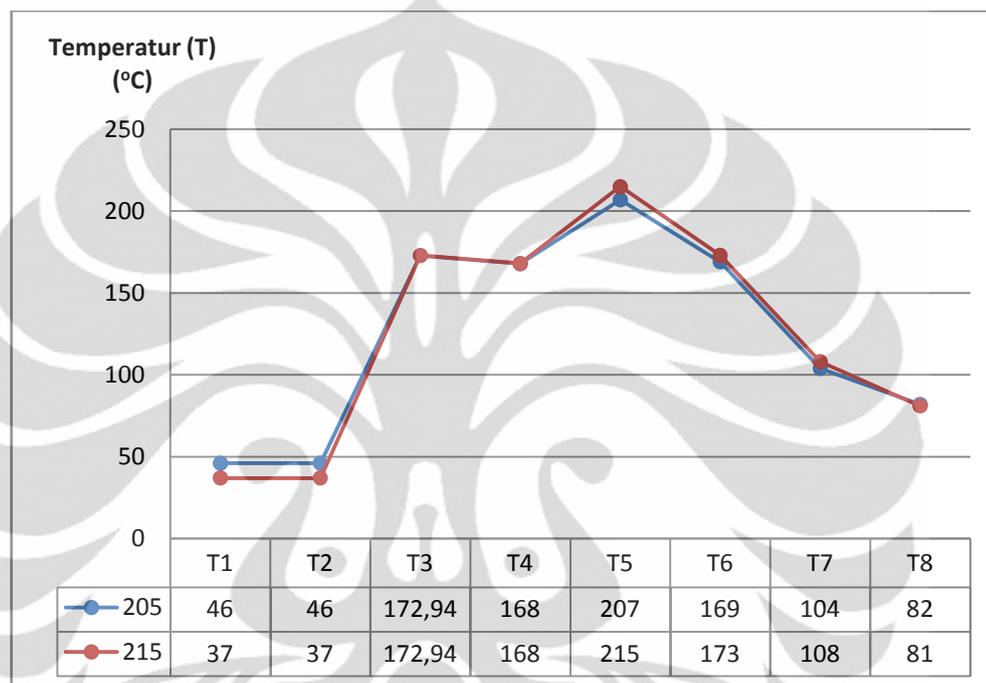
Dalam membandingkan dua kondisi ini maka ada beberapa parameter yang dijadikan sebagai objek, diantaranya yaitu temperatur, tekanan, entalpi dan efisiensi termal. Pada gambar 4.4 terlihat grafik perbandingan tekanan, dari grafik tidak ada perbedaan signifikan yang terjadi, karena tekanan operasi dari PLTU sudah diatur oleh sistem. Tekanan maksimum yang terjadi yaitu 8,5 barg dan tekanan minimum adalah 1 barg.



Gambar 4.7. Perbandingan tekanan

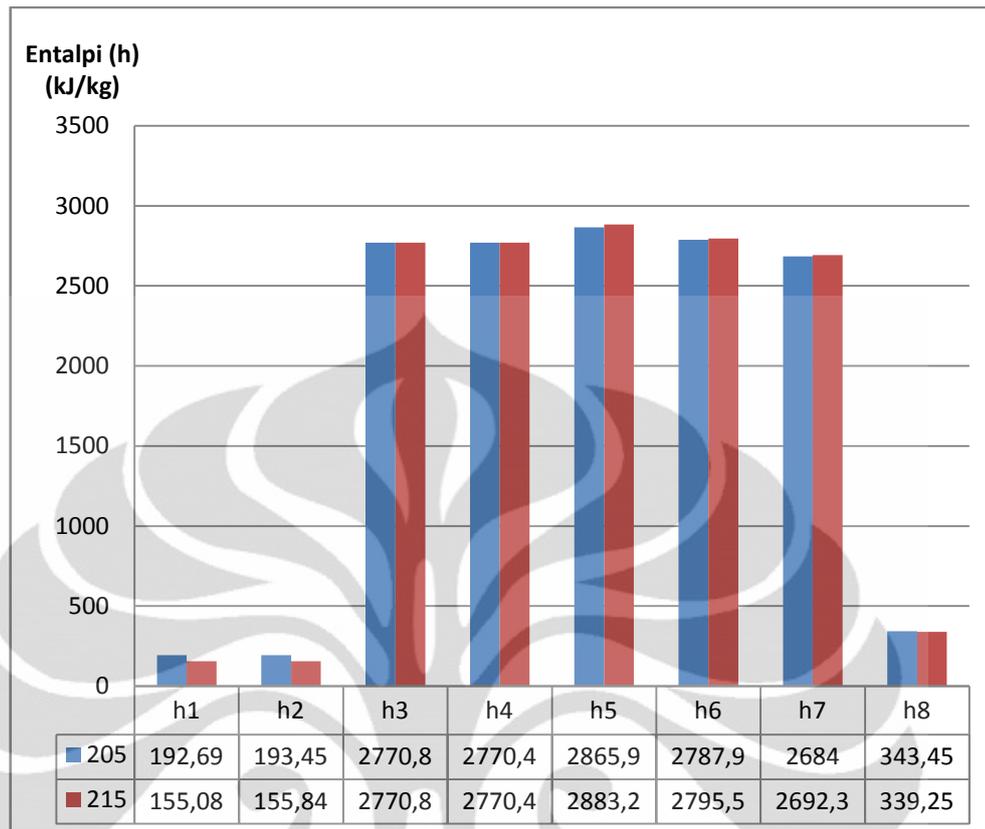
Pada gambar 4.5 terlihat grafik perbandingan temperatur, kondisi pada saat keluar boiler temperaturnya sama padahal temperatur pada saat masuk boilernya berbeda. Hal ini terjadi karena temperatur maksimum yang keluar dari boiler adalah 168 °C. Dengan adanya perbedaan temperatur masuk boiler maka akan berpengaruh dengan konsumsi bahan bakar yang digunakan untuk menaikkan temperatur air hingga dapat berubah menjadi uap.

Setelah keluar dari boiler maka uap dipanaskan kembali oleh *superheater* dan dengan pengaturan temperatur yang berbeda maka temperatur keluarnya juga akan berbeda. Temperatur yang sudah diatur oleh *superheater* ini hasil temperatur keluarnya tidak konstan sama, akan tetapi berfluktuasi. Burner pada *superheater* akan hidup dan mati pada  $\pm 3^\circ\text{C}$  dari *setting point temperatur* pada *superheater*.



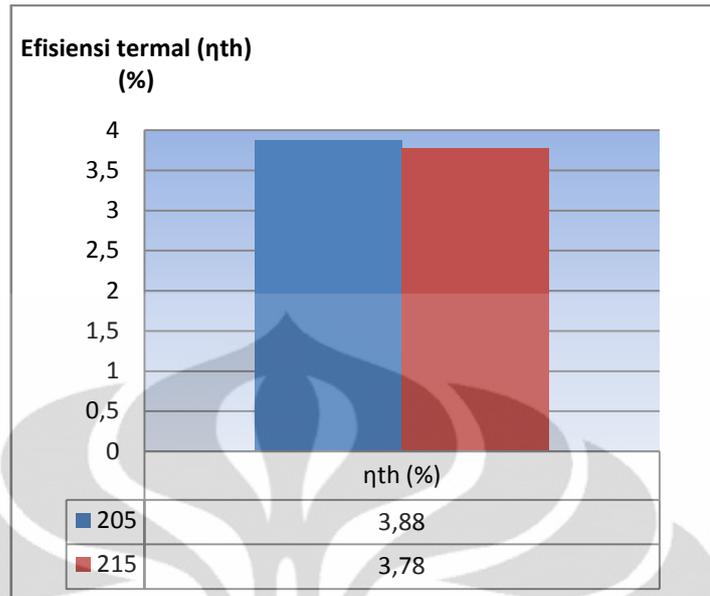
Gambar 4.8. Perbandingan temperatur

Pada gambar 4.6 terlihat grafik perbandingan entalpi, grafik tersebut menggambarkan nilai energi berupa entalpi pada masing-masing titik di dua kondisi yang berbeda. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan nilai entalpi yang terjadi pada kedua kondisi nilainya kecil bila dibandingkan energi yang ada pada sistem pada masing-masing titik tersebut.



Gambar 4.9. Perbandingan entalpi

Pada gambar 4.7 terlihat grafik perbandingan efisiensi termal, bila dibandingkan dengan kondisi superheater yang temperaturnya diatur pada 205 °C dengan nilai efisiensi termal sistem sebesar 3,88%, maka nilainya 0,1% lebih besar dari pada kondisi pada saat temperatur superheater diatur pada 215 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada beban yang sama yaitu 450 Watt dikedua kondisi tersebut, kenaikan temperatur menyebabkan menurunnya efisiensi termal dari sistem. Artinya bahwa jika kita terus menaikkan temperatur superheater tanpa diiringi dengan kenaikan beban maka hal tersebut hanya akan membuang energi dan menghabiskan lebih banyak bahan bakar.



Gambar 4.10. Perbandingan efisiensi termal

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan analisa hasil pengujian maka ada beberapa hal yang dapat disimpulkan, yaitu :

1. Dalam membuat diagram fase maka data yang diperlukan adalah tekanan dan temperatur pada titik tertentu. Tekanan dan temperatur tersebut harus pada titik yang sama agar diperoleh kondisi yang sebenarnya.
2. Energi kalor yang terbuang sangat besar bila dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh turbin, hal tersebut terlihat pada nilai efisiensi termal yang kecil yaitu sebesar 3,78%, padahal untuk PLTU konvensional efisiensi yang dihasilkan 30-35%. Kerugian kalor tersebut diantaranya dari *losses* yang terjadi pada saat pendistribusian uap, kalor yang dibuang untuk mengkondensasikan uap, dan kalor yang terbuang karena percampuran air dan kondensat pada tangki kondensat.
3. Bila dibandingkan dengan kondisi superheater yang temperaturnya diatur pada 205°C dengan nilai efisiensi termal sistem sebesar 3,88%, maka nilainya 0,1% lebih besar dari pada kondisi pada saat temperatur superheater diatur pada 215°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada beban yang sama yaitu 450 Watt dikedua kondisi tersebut, kenaikan temperatur menyebabkan menurunnya efisiensi termal dari sistem PLTU 450 Watt ini.
4. a. Miniatur PLTU ini sudah 10 tahun tidak beroperasi, sehingga banyak sekali masalah-masalah yang terjadi dan menyebabkan alat ini tidak dapat beroperasi dengan baik.  
b. Dengan adanya penelitian ini, maka beberapa permasalahan yang ada kemudian diselesaikan. Beberapa tindakan yang dilakukan yaitu mengganti *distributor pipe* dan kawat kasa pada *cooling tower*, memasang penutup *cooling tower*, melapisi tangki kondensat dengan cara *hot deep*, pemasangan selang dan pipa air yang menghubungkan saluran keluar pendingin bearing dengan *cooling tower*, pemasangan selang kompresor, pemasangan jalur aliran air dan uap, pemasangan kode untuk alat ukur dan *valve*.

## 5.2. Saran

1. Dalam pengambilan data pada saat pengujian, disarankan agar dilakukan lebih dari dua orang. Hal ini dimaksudkan agar data yang diperoleh diambil pada waktu yang bersamaan.
2. Alat ukur yang digunakan dalam pengujian ini masih analog dan tingkat ketelitian pembacaan alat ukur masih dipengaruhi oleh operator yang melakukan pembacaan tersebut. Maka disarankan agar alat ukur diganti, sebagai contoh seperti menggunakan termokopel dan *pressure transducer*.
3. Untuk menentukan titik 2 yaitu titik dimana air keluar dari pompa dan akan masuk ke boiler diasumsikan tekanan keluarannya adalah 8,5 bara. Tekanan ini sebenarnya merupakan tekanan keluar dari boiler, jadi ada kemungkinan terjadinya kesalahan dalam perhitungan akibat penentuan titik 2 yang kurang tepat. Oleh sebab itu, maka perlu adanya alat ukur yang ditambahkan yaitu berupa alat ukur tekanan dan temperatur, agar diperoleh titik yang tepat pada diagram.
4. Temperatur uap yang keluar dari turbin juga masih tinggi yaitu 108°C sedangkan termometer yang terpasang hanya mampu membaca hingga temperatur 110°C. Hal ini akan berdampak pada termometer yang terpasang karena temperatur yang keluar dari turbin tersebut memiliki kecenderungan semakin meningkat seiring dengan dinaikkannya *setting* temperatur pada *superheater*. Oleh sebab itu, disarankan agar dilakukan penggantian pada termometer tersebut dengan range temperatur yang lebih tinggi.
5. Ada beberapa hal yang dapat dijadikan bahan penelitian selanjutnya diantaranya yaitu :
  - a. Mengganti kondenser dengan radiator, karena dari hasil pengujian yang telah dilakukan kondenser tidak mampu mengkondensasi seluruh uap yang keluar dari turbin.
  - b. Memanfaatkan gas buang yang berasal dari boiler dan *superheater* yaitu dengan memasang *economizer* untuk memanaskan air sebelum masuk keboiler.

## DAFTAR REFERENSI

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (2nd ed.). United States of America: McGraw-Hill.
- Drbal, Lawrence F., (1996), *Power Plant Engineering*, New York: Springer Science+Business Media, Inc.
- 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.
- Kiameh, Philip., (2002). *Power Generation Handbolk*, United States of America: McGraw-Hill, Inc.
- Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Chichester: John Wiley & Sons.
- Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., (2004). *Termodinamika Teknik Jilid 1*, Jakarta: Erlangga.
- Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., (2004). *Termodinamika Teknik Jilid 2*, Jakarta: Erlangga.
- Suyanto., (2009). *Perbandingan Perhitungan Efisiensi Antara PLTU Konvensional dan PLTN*, Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir, 5 – 6 Agustus 2009.

## LAMPIRAN 1

### Sifat air jenuh : Tabel Temperatur

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

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

(lanjutan)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

## LAMPIRAN 2

### Sifat air jenuh : Tabel Tekanan

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

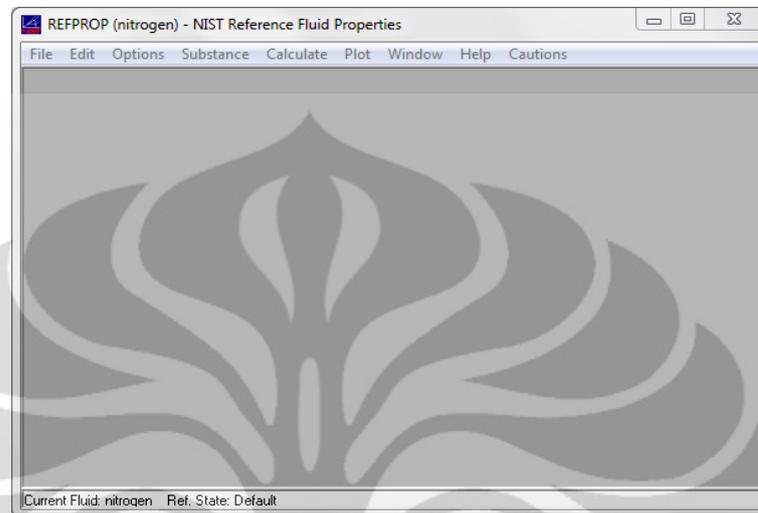
Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

**LAMPIRAN 3**  
**Tabel sifat pada *software* Refprop**

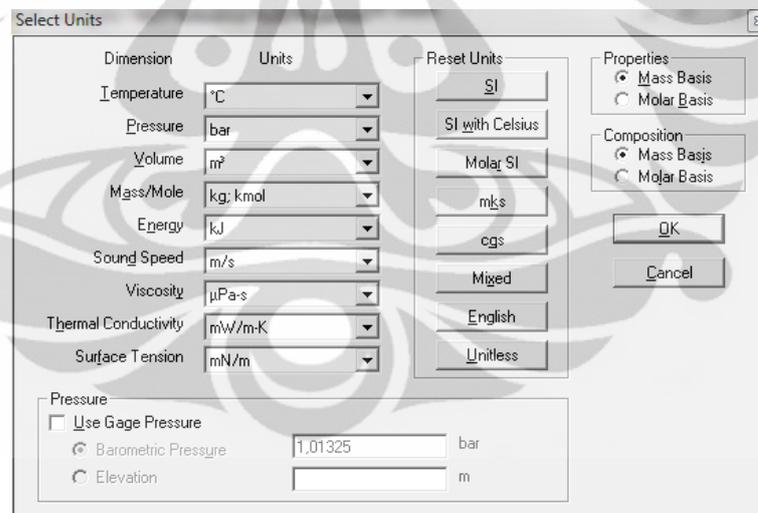
	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Liquid Density (kg/m <sup>3</sup> )	Vapor Density (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Liquid Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Vapor Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	37,000	1,0000	993,33	993,33	Subcooled	0,0010067	0,0010067	Subcooled	155,08	155,08	Subcooled	0,53213	0,53213	Subcooled
2	37,000	8,5000	993,66	993,66	Subcooled	0,0010064	0,0010064	Subcooled	155,75	155,75	Subcooled	0,53186	0,53186	Subcooled
3	172,94	8,5000	4,4073	Superheated	4,4073	0,22689	Superheated	0,22689	2770,8	Superheated	2770,8	6,6409	Superheated	6,6409
4	168,00	7,0000	3,6330	Superheated	3,6330	0,27526	Superheated	0,27526	2770,4	Superheated	2770,4	6,7245	Superheated	6,7245
5	215,00	6,0000	2,7408	Superheated	2,7408	0,36485	Superheated	0,36485	2883,2	Superheated	2883,2	7,0361	Superheated	7,0361
6	173,00	5,2000	2,6211	Superheated	2,6211	0,38151	Superheated	0,38151	2795,5	Superheated	2795,5	6,9122	Superheated	6,9122
7	108,00	1,0000	0,57637	Superheated	0,57637	1,7350	Superheated	1,7350	2692,3	Superheated	2692,3	7,4048	Superheated	7,4048
8	81,000	1,0000	971,16	971,16	Subcooled	0,0010297	0,0010297	Subcooled	339,25	339,25	Subcooled	1,0874	1,0874	Subcooled

## LAMPIRAN 4 Prosedur pembuatan diagram Rankine dengan *software* Refprop

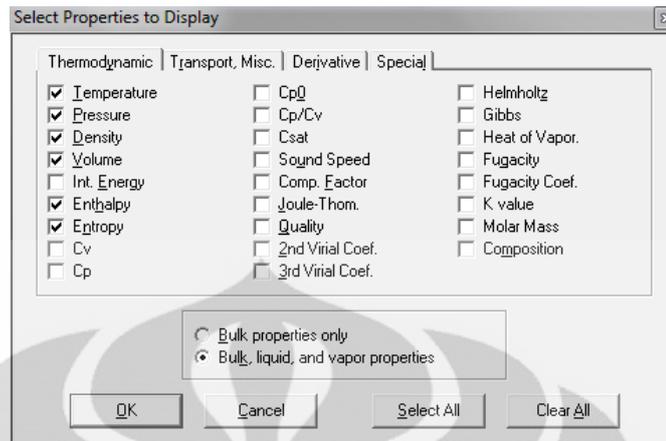
### 1. Buka software Refprop



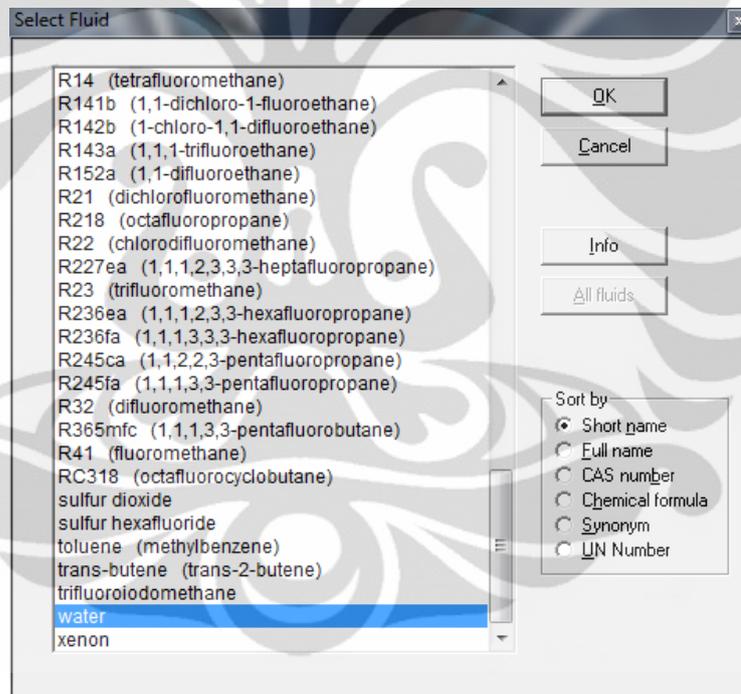
### 2. Atur satuan yang akan digunakan (Options->Units)



3. Tentukan sifat-sifat yang akan ditampilkan (Options->Properties)



4. Tentukan fluida yang digunakan (Substance->Pure Fluid (Single Compounds))



5. Sebagai contoh maka kita akan membuat diagram h-s (Plot-> h-s diagram) lalu atur temperature, pressure, entropy, enthalpy dan quality seperti tampak pada gambar.

Setup Enthalpy vs. Entropy Plot

<input checked="" type="checkbox"/> Temperature (°C)	<input checked="" type="checkbox"/> Pressure (bar)	<input type="checkbox"/> Density (kg/m³)	<input checked="" type="checkbox"/> Quality
From: 37 To: 215 Step: 25	From: 0 To: 8,5 Step: 0,1	From: 50 To: 1000 Step: 50	From: 0 To: 1 Step: 0,2
<input type="checkbox"/> Show 2-phase	<input type="checkbox"/> Show 2-phase	<input type="checkbox"/> Show 2-phase	

Axis scaling

x-Axis Range: 0 to 8 kJ/kg-K Entropy

y-Axis Range: 0 to 3100 kJ/kg Enthalpy

Point spacing

Coarse  
 Medium  
 Fine  
 Very fine

Options

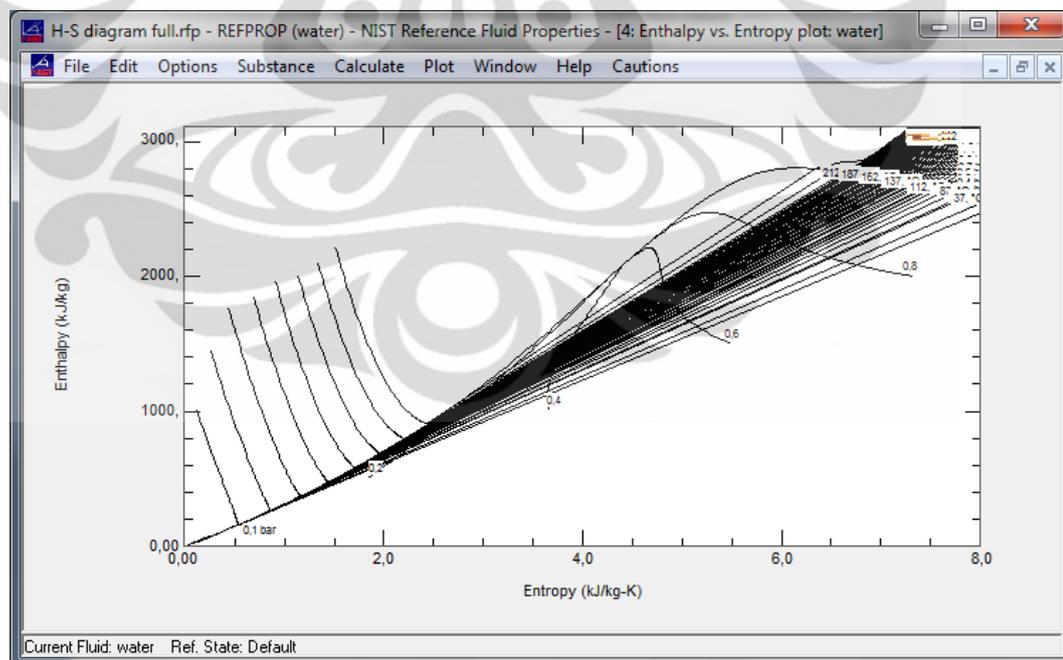
Draw saturation lines  
 Draw melting line  
 Connect saturation states  
 Swap density for specific volume  
 Add s and v lines at saturated temp.

Labels

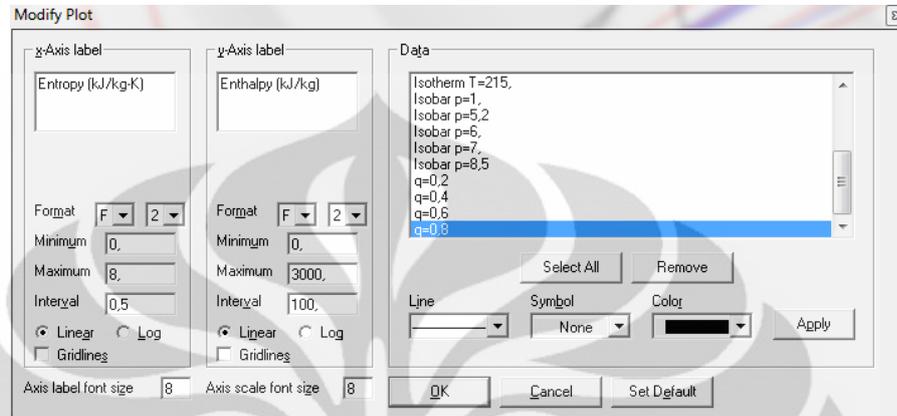
Include labels  
 with units  
 Unlabeled Lines

Buttons: OK, Cancel, More

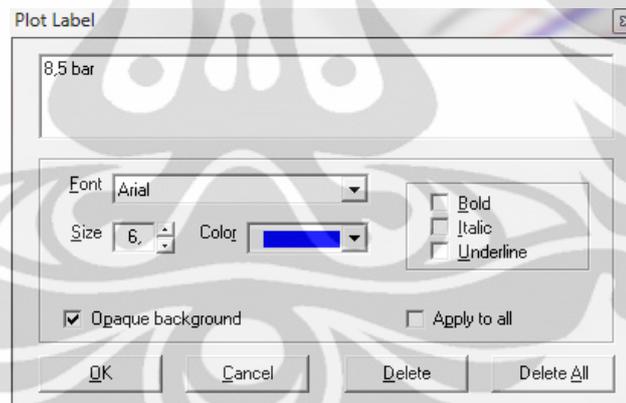
6. Setelah itu klik tombol OK maka akan terlihat seperti gambar dibawah ini



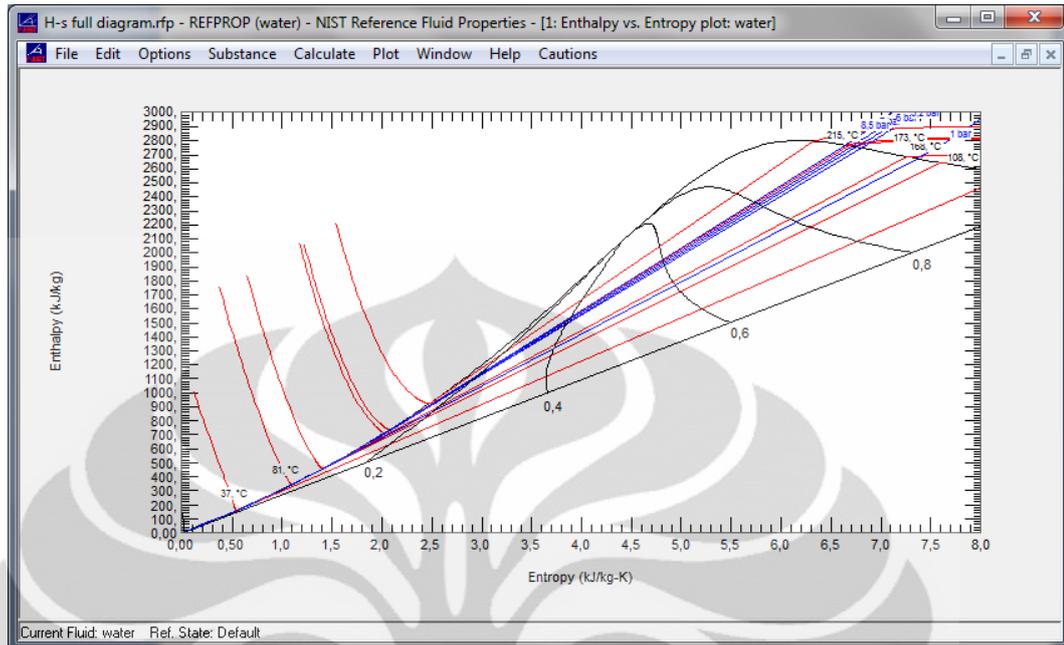
7. Untuk memperbaiki tampilan diagram agar lebih bagus maka dilakukan modifikasi. Pada kolom data, hapus data tekanan dan temperatur yang tidak digunakan dengan menggunakan tombol Remove lalu warnai tekanan dengan warna biru sedangkan temperatur dengan warna merah.



8. Setelah itu hapus seluruh label yang ada kemudian tambahkan lagi label tersebut untuk garis-garis tertentu saja (Plot->Add label)



9. Sehingga akan menghasilkan gambar seperti terlihat dibawah ini.



10. Software Refprop hanya mampu membuat garis-garis referensi berupa garis temperatur, tekanan, kualitas entalpi dan entropi. Akan tetapi untuk garis proses maka kita membuatnya secara manual di Microsoft Word. Untuk itu maka copy diagram (Edit->Copy plot) dan paste kedalam Microsoft Word, sehingga dapat dihasilkan diagram h-s seperti tampak pada gambar dibawah ini.

