



**TUGAS AKHIR - TM 145547**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI KONDISI  
PENDISTRIBUSIAN LAJU ALIRAN MASSA UAP KE  
PABRIK II DAN III TERHADAP UNJUK KERJA  
SIKLUS RANKINE UNIT BATUBARA (UBB)  
PT.PETROKIMIA GRESIK**

**IMAM SYAFI'I**  
**NRP 2114 030 062**

**Dosen Pembimbing**  
**Giri Nugroho, ST.MSc.**  
**19791029 201212 1 002**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI**  
**Fakultas Vokasi**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM 145547**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI KONDISI  
PENDISTRIBUSIAN LAJU ALIRAN MASSA UAP KE  
PABRIK II DAN III TERHADAP UNJUK KERJA  
SIKLUS RANKINE UNIT BATUBARA (UBB)  
PT.PETROKIMIA GRESIK**

IMAM SYAFI'I  
NRP 2114 030 062

Dosen Pembimbing  
Giri Nugroho, ST.MSc.  
19791020 201212 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI  
Fakultas vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TM 145547

**ANALYSIS THE EFFECT OF VARIATION THE  
STEAM MASS FLOW RATE DISTRIBUTION  
CONDITION TO PLANT II AND III ON THE  
RANKINE CYCLE PERFORMANCE OF BATUBARA  
UNIT PT.PETROKIMIA GRESIK**

IMAM SYAFI'I  
NRP 2114 030 062

Counsellor Lecturer  
Giri Nugroho, ST.MSc.  
19791029 201212 1 002

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Vokasi  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT - TM 145547**

**ANALYSYS THE EFFECT OF VARIATION THE  
STEAM MASS FLOW RATE DISTRIBUTION  
CONDITION TO PLANT II AND III ON THE RANKINE  
CYCLE PERFORMANCE OF BATUBARA UNIT  
PT.PETROKIMIA GRESIK**

**IMAM SYAFI'I**  
**NRP 2114 030 062**

**Counsellor Lecturer**  
**Giri Nugroho, ST.MSc.**  
**19791029 211212 1 002**

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING**  
**Faculty of Vokasi**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2017**

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI KONDISI  
PENDISTRIBUSIAN LAJU ALIRAN MASSA UAP KE  
PABRIK II DAN III TERHADAP UNJUK KERJA SIKLUS  
RANKINE UNIT BATUBARA (UBB) PT.PETROKIMIA  
GRESIK**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Ahli Madya

Pada

Bidang Studi Konversi Energi  
Departemen Teknik Mesin Industri  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Oleh :

**IMAM SYAFI'I**

**NRP. 2114 030 062**

Mengetahui,  
Dosen pembimbing



**SURABAYA,  
JULI 2017**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI KONDISI  
PENDISTRIBUSIAN LAJU ALIRAN MASA UAP UNTUK  
OPERASIONAL PABRIK II DAN III TERHADAP UNJUK  
KERJA SIKLUS RANKINE UNIT BATUBARA (UBB)  
PT.PETROKIMIA GRESIK.**

**Nama Mahasiswa** : Imam Syafi'i  
**NRP** : 2114 030 062  
**Jurusan** : Departemen Teknik Mesin Industri  
FV-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Giri Nugroho, ST,MSc.

**Abstrak**

*Salah satu jenis system pembangkitan yang banyak digunakan adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang bekerja dengan siklus rankine. PT.Petrokimia Gresik merupakan BUMN yang menggunakan pembangkit listrik tenaga uap ( unit Batubara ) yang dikelola secara mandiri oleh perusahaan untuk memasok energy listrik utama bagi pabrik II dan III serta memasok uap untuk operasional produksi pabrik II dan III. System pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III tentu sangat mempengaruhi performa siklus rankine system pembangkitan, sehingga diperlukan studi lebih lanjut untuk mengetahui komposisi yang tepat pada system pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III agar diperoleh komposisi yang menghasilkan unjuk kerja yang maksimal.*

*Analisa unjuk kerja siklus rankine menggunakan pendekatan secara termodinamika dengan menggunakan data heat balance dan data operasional unit batubara PT.Petrokimia Gresik.*

*Analisa termodinamika pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik menunjukkan bahwa kondisi yang optimal untuk pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III adalah sepenuhnya melalui bypass ekstraksi turbin agar diperoleh performa siklus rankine yang maksimal. Berdasarkan perhitungan*

*secara termodinamika pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap melalui bypass ekstraksi turbin diperoleh  $W_{net}$  sebesar 17,92 MW,  $\eta$  sebesar 24,09 persen dan HR sebesar 4,15 pada jumlah tonase batubara yang sama yakni 477 ton selama 24 jam.*

**Kata Kunci: Unjuk Kerja, laju Aliran Massa Uap, PLTU.**

**ANALYSIS THE EFFECT OF VARIATION THE STEAM  
MASS FLOW RATE DISTRIBUTION CONDITION TO  
PLANT II AND III ON THE RANKINE CYCLE  
PERFORMANCE OF BATUBARA UNIT PT.PETROKIMIA  
GRESIK**

**Nama Mahasiswa : Imam Syafi'i**  
**NRP : 2114 030 062**  
**Jurusan : Departemen Teknik Mesin Industri**  
**FV-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Giri Nugroho, ST,MSc.**

**Abstract**

*One type of generating system that widely used is a steam power plant (PLTU) that works with the rankine cycle. PT.Petrokimia Gresik is a state-owned enterprise that uses a steam power plant (Batubara unit) which is managed independently by the company to supply primary electricity for plants II and III. The distribution system of steam mass flow rate to plants II and III would greatly affect the performance of rankin cycle of generating system, so that further study is needed to know the exact composition of the system of steam mass flow rate distribution to the plants in order to produce a composition that produces Maximum performance.*

*The study of rankine cycle using thermodynamic analysis by using heat balance report and operational report of Batubara unit PT.Petrokimia Gresik.*

*Present study concluded that the Batubara Unit of PT.Petrokimia Gresik showed the optimal condition for the distribution of steam mass flow rate to the Plants II and III is entirely through turbine extraction in order to obtain maximum rankine cycle performance. Based on thermodynamic calculation on the condition of steam mass flow distribution through the extraction of turbines obtained  $W_{net}$  of 17.92 MW,  $\eta$  of 24.09*

*percent and HR of 4.15 on the same amount of coal tonnage of 477 tons for 24 hours.*

**Keywords: Load, Performance, Overhaul, PLTGU.**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **ANALISIS PENGARUH VARIASI KONDISI PENDISTRIBUSIAN LAJU ALIRAN MASSA UAP KE PABRIK II DAN III TERHADAP UNJUK KERJA SIKLUS RANKINE UNIT BATUBARA (UBB) PT.PETROKIMIA GRESIK**. Sholawat serta Salam yang selalu tercurah kepada junjungan nabi besar baginda Muhammad SAW yang telah menuntun kita dari jalan yang gelap menuju jalan yang terang benderang.

Tersusunnya Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan dan kerja sama yang baik dari semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat di dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Giri Nugroho, ST.MSc. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberi saran, bimbingan dan ilmu yang bermanfaat sehingga penulis mampu menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
3. Bapak Ir. Suhariyanto, MSc selaku koordinator tugas akhir Program Studi D3 Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
4. Bapak Ir. Eddy Widiyono MSc. selaku dosen wali yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Bapak / Ibu dosen dan seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS yang telah banyak membimbing dan membantu selama perkuliahan.
6. Bapak Ariq, Bapak sahran, Mas dito, Mas tomi, Bapak-Bapak operator CCR UBB, Bapak-Bapak Candal-HAR pabrik III

PT.Petrokimia Gresik, dan seluruh staff operasional unit Batubara PT.Petrokimia Gresik. Terima kasih atas bantuan, data, ilmu, dan bimbingan yang telah diberikan sehingga penulis dapat terbantu untuk penyelesaian tugas akhir.

7. Abah dan Umi yang senantiasa memberikan dukungan baik secara moril maupun materil sehingga penulis mampu untuk menyelesaikan Tugas akhir ini.
8. Seluruh keluarga penulis yang telah memberi dukungan serta doa yang baik.
9. Saudara Ismail maydiyanto yang telah memberikan pengarahannya dan ilmu sehingga penulis dapat terbantu untuk penyelesaian tugas akhir.
10. Untuk teman-teman yang memberi 'warna' dalam pengerjaan tugas akhir ini, Renaldi Ardiansyah, Wildan, Faridatuz Zulfa, Anita Vizenza, dan teman gokil lainnya.
11. Untuk teman seperjuangan TA, dan untuk saudara mahasiswa D3MITS.
12. Serta berbagai pihak yang belum tertulis, tetapi sangat berarti dalam penyelesaian tugas akhir.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Allah SWT.

Penulis menyadari bahwasannya tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka penulis berharap Tugas Akhir ini dapat terus dikembangkan dan disempurnakan lebih lanjut.

Surabaya, Juli 2017

**Penulis**

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL (Versi bahasa Indonesia)</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN JUDUL (Versi bahasa Inggris)</b> .....	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Maksud dan Tujuan .....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Pendahuluan .....	5
2.1.1. Boiler .....	6
2.1.2. Turbin Uap .....	10
2.1.3. Kondensor .....	15
2.1.4. Pompa .....	16
2.1.5. Deaerator .....	17
2.2. Tinjauan Termodinamika .....	18
2.2.1. Hukum Pertama Termodinamika Untuk Control Volume .....	18
2.2.2. Hukum Kedua Termodinamika .....	26
2.2.3. Konsep Irreversibilitas pada PLTU.....	28
2.3. Siklus Rankine Pada Turbin Uap UBB .....	29

2.3.1. Siklus Rankine Ideal .....	29
2.3.2. Siklus Rankine Aktual UBB .....	31
2.3.3. Evaluasi Kerja dan Energi Kalor Pada Siklus Aktual.....	32
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>37</b>
3.1. Metode Penulisan Tugas Akhir .....	37
3.2. Flow Chart Penelitian .....	38
3.3. Flow Chart Perhitungan .....	40
<b>BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
4.1. Data Yang Digunakan .....	43
4.2. Diagram Blok UBB PT.Petrokimia Gresik .....	43
4.3. Data operasional UBB PT.Petrokimia Gresik Pada tanggal 3 februari 2017.....	43
4.3.1. Perhitungan Properties Pada Cek Point.....	43
4.3.2. Langkah Perhitungan .....	46
4.4. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan Kondisi pendistribusian laju aliran massa uap Melalui outlet boiler dan ekstraksi turbin uap.....	54
4.5. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan Kondisi pendistribusian laju aliran massa uap Hanya melalui outlet boiler .....	58
4.6. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan Kondisi pendistribusian laju aliran massa uap Hanya melalui ekstraksi turbin uap .....	62
4.7. Rekap perhitungan unjuk kerja siklus rankine Pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran Massa uap ke pabrik II dan III.....	66
4.8. Grafik unjuk kerja siklus rankine pada variasi Kondisi pendistribusian laju aliran massa uap Ke pabrik II dan III.....	67

<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>69</b>
5.1. Kesimpulan .....	69
5.2. Saran .....	69
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Skema umum Pembangkit listrik tenaga Uap .....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Konstruksi Boiler .....	7
<b>Gambar 2.3</b>	Turbin Uap UBB PT.Petrokimia Gresik .....	12
<b>Gambar 2.4</b>	Kondensor UBB PT.Petrokimia Gresik .....	16
<b>Gambar 2.5</b>	Deaerator .....	18
<b>Gambar 2.6</b>	<i>Control Volume</i> Konservasi Massa .....	19
<b>Gambar 2.7</b>	<i>Control Volume</i> Konservasi Massa dan Energi ..	21
<b>Gambar 2.8</b>	T-S Diagram Perubahan Entropi .....	26
<b>Gambar 2.9</b>	Ilustrasi Pernyataan Clausius .....	27
<b>Gambar 2.10</b>	Ilustrasi Pernyataan Kelvin-Planck .....	28
<b>Gambar 2.11</b>	Blok Diagram Siklus Rankine Ideal .....	30
<b>Gambar 2.12</b>	Blok Diagram Silus Rankine Aktual .....	32
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	38
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Alir Perhitungan .....	40
<b>Gambar 4.1</b>	Diagram Blok UBB PT.Petrokimia Gresik .....	44
<b>Gambar 4.2</b>	Diagram Variasi I .....	54
<b>Gambar 4.3</b>	Diagram Variasi II .....	48
<b>Gambar 4.4</b>	Diagram Variasi III .....	62
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik unjuk kerja siklus rankine pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ..	67

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b> Kondisi Tekanan, Temperatur dan Mass Flow Rate Pada Masing-Masing Cek Poin tanggal 3 februari 2017 .....	45
<b>Tabel 4.2</b> Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap melalui outlet boiler dan ekstraksi turbin uap.....	57
<b>Tabel 4.3</b> Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap hanya melalui outlet boiler.....	62
<b>Tabel 4.4</b> Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap hanya melalui ekstraksi turbin uap .....	66
<b>Tabel 4.5</b> Tabel rekap perhitungan unjuk kerja siklus rankine pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap .....	66

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

System utilitas Unit Batubara (UBB) PT.Petrokimia Gresik adalah suatu pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh pembakaran batubara sebagai bahan bakar utama untuk memanaskan air (demin water) menjadi uap panas (superheated) yang nantinya akan memutar turbin uap yang telah di couple ke Generator untuk menghasilkan energy listrik. Cara kerja UBB secara garis besar sama dengan PLTU pada umumnya yakni menggunakan siklus rankine, hanya saja ada perbedaan pada pendistribusian uap yang juga digunakan untuk proses operasional produksi pabrik II dan III.

Sebagai salah satu penyedia kebutuhan energi listrik di PT.Petrokimia Gresik, Tentu peranan UBB sangatlah penting untuk operasional kegiatan pabrik, khususnya pabrik II dan III, dimana UBB menjadi pemasok listrik Utama untuk operasional pabrik. Selain sebagai pemasok kebutuhan energy listrik, UBB juga berperan sebagai pemasok kebutuhan uap untuk proses operasional pabrik terkait dengan kegiatan produksi

UBB Sebagai pembangkit listrik tenaga Uap dinilai sangat cocok di tempatkan di pabrik III PT.Petrokimia Gresik sebab pembangkit tenaga uap merupakan salah satu unit pembangkit listrik yang memiliki efisiensi yang baik kemudian proses produksi pada pabrik II dan III yang membutuhkan uap (steam) dalam operasionalnya tentu semakin menambahkan nilai efektifitas kerja UBB sebagai pemasok energi listrik dan uap untuk operasional pabrik III. Komposisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III tentu sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja siklus rankine, oleh karena itu diperlukan studi lebih lanjut untuk memperoleh komposisi yang tepat terkait pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III agar diperoleh unjuk kerja

siklus rankine yang optimal. Optimalisasi pada sitem utilitas UBB dapat dilihat dari parameter unjuk kerja siklus Rankine di unit tersebut. Parameter unjuk kerja siklus Rankine meliputi Efisiensi Thermal dan Heat Rate.

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis akan melakukan Analisa unjuk kerja siklus Rankine UBB PT.Petrokimia Gresik pada variasi keadaan pendistribusian laju aliran massa uap untuk operasional produksi pabrik II dan III.

### **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang terdapat pada tugas akhir ini yaitu bagaimana performa siklus Rankine yang terdapat pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran masa uap ke pabrik II dan III, dengan menggunakan indikator heat rate, daya turbin, dan efisiensi siklus.

### **1.3. Maksud dan Tujuan**

Penulis tugas akhir ini membahas tentang performa siklus Rankine yang terdapat pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik pada keadaan variasi kondisi distribusi laju aliran masa uap untuk kegiatan operasional Pabrik II dan III.

Untuk mengetahui performa siklus Rankine yang terdapat pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik pada keadaan variasi kondisi pendistribusian laju aliran masa uap untuk kegiatan produksi ke pabrik II dan III PT.Petrokimia Gresik.

### **1.4. Batasan Masalah**

Agar permasalahan yang dibahas tidak terlalu meluas, maka diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Data didapat dari hasil rekapitulasi operasi yang direkap oleh bagian OP UBB PT. Petrokimia Gresik untuk system utilitas unit Batubara pada tanggal 3 Februari tahun 2017

- dan Mass & Heat Balance unit Batubara PT.Petrokimia Gresik dengan beban 9,6 MWh.
2. Data unjuk kerja beberapa komponen unit didapat dari data operasional Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik.
  3. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine didasarkan pada analisis termodinamika dengan beberapa asumsi.
  4. Data-data lain yang diperlukan dalam analisis dan perhitungan diambil sesuai dengan literatur yang relevan.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Adaun manfaat yang dapat diperoleh dari penulis Tugas Akhir itu sendiri adalah:

1. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Uap khususnya dalam bidang turbin uap.
2. Sebagai bahan masukan bagi para pembaca khususnya mahasiswa Program Studi D3 Teknik Mesin Konversi Energi yang membahas masalah dan topik yang sama.
3. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi bagian operasional unit Batubara PT.Petrokimia Gresik dalam memberikan kebijakan maintenance & operasi sehingga didapat unjuk kerja operasi unit yang baik.

### **1.6. Sistematika penulisan**

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini terbagi menjadi beberapa bab yaitu sebagai berikut:

#### **Bab I Pendahuluan**

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian serta sistematika penulisan.

## Bab II Dasar teori

Bab ini berisi teori-teori dari berbagai referensi yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam melakukan perhitungan dan analisis termodinamika.

## Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini terdiri dari tahapan yang digunakan dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan tugas akhir.

## Bab IV Perhitungan dan Pembahasan

Bab ini terdiri dari tahapan perhitungan unjuk kerja Siklus Rankine unit dan efisiensi dengan analisis termodinamika dan perbandingannya pada beban maksimal dan kondisi terkini.

## Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil perhitungan, perbandingan dan pembahasan yang telah dilakukan dan saran untuk operasi dan maintenance unit serta penelitian selanjutnya.

## **BAB II**

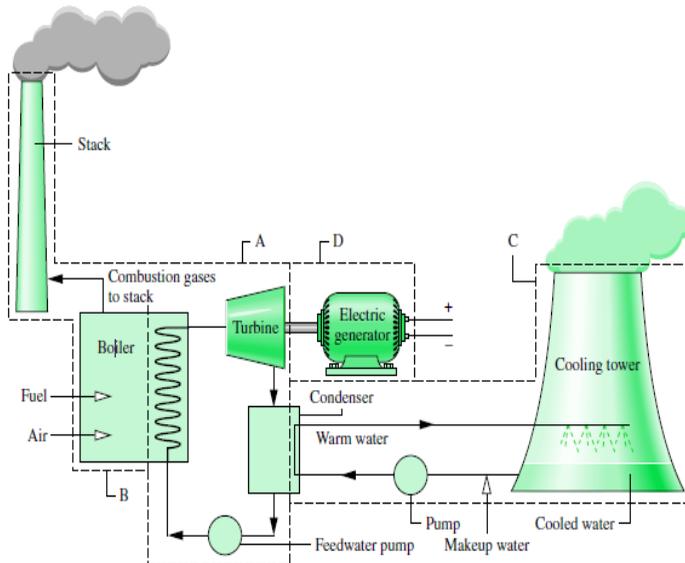
### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Pendahuluan**

Unit batubara (UBB) PT.Petrokimia Gresik adalah pembangkit listrik tenaga Uap dengan menggunakan batubara sebagai bahan bakar Utamanya untuk memanaskan air (demin water) menjadi uap superheated yang digunakan sebagai fluida kerja untuk memutar sudu-sudu Turbin uap yang nantinya energy kinetik yang di hasilkan akan di konversi menjadi energy listrik oleh Generator . UBB selain di desain menjadi penyuplai utama kebutuhan listrik pabrik III PT.Petrokimia Gresik juga di fungsikan sebagai penyuplai Uap (steam) untuk keperluan operasional Produksi pada pabrik II dan III PT.petrokimia Gresik . sehingga uap yang di hasilkan oleh Boiler tidak semuanya masuk ke dalam turbin namun ada sebagian yang di distribusikan untuk operasional pabrik II dan III.

Prinsip kerja UBB sama seperti PLTU pada umumnya yakni menggunakan siklus rankine dimana uap panas yang di produksi boiler digunakan untuk memutar sudu sudu turbin uap. kemudian keluar turbin, Uap akan masuk kedalam condenser untuk di kondensasikan yang hasilnya akan di pompakan lagi menuju boiler untuk di panaskan kembali menjadi uap panas (superheated) yang digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin.

Namun dalam kondisi unit batubara PT.Petrokimia Gresik yang juga difungsikan sebagai pemasok uap panas untuk operasional pabrik II dan III, maka akan ada *make up Demin Water* yang dimasukkan kedalam Deaerator untuk mengganti laju aliran massa uap yang di distribusikan ke pabrik II dan III , sehingga siklus dapat berjalan dalam keadaan steady.



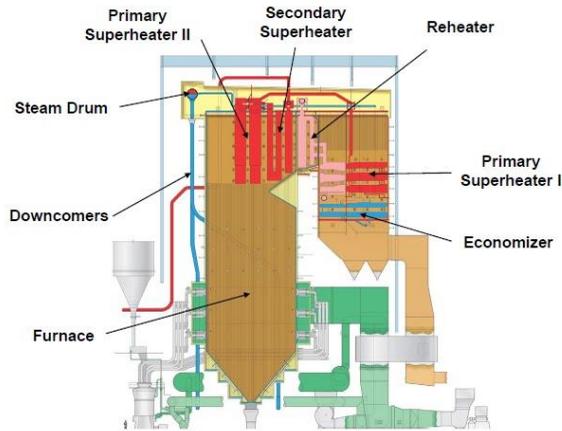
Gambar 2.1 skema umum PLTU  
(Reff 6, hal. 326)

### 2.1.1 Boiler

yang umumnya disebut ketel uap merupakan satu bagian utama dari PLTU yang fungsinya adalah untuk memproduksi uap yang selanjutnya uap tersebut dialirkan ke turbin.

**a. Boiler terdiri dari dua komponen utama yaitu:**

1. Ruang bakar sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. Alat penguapan terdiri dari pipa-pipa penguap yang mengubah energi pembakaran (energi kimia) menjadi energi potensial uap, (energi panas).



Gambar 2.2 Konstruksi Boiler

(<http://bubihh.blogspot.co.id/2014/12/komponen-boiler-pltu.html>)

**b. Konstruksi boiler dari beberapa bagian antara lain :**

**1. Tube Wall**

Tube Wall adalah merupakan pipa yang dirangkai membentuk dinding dan dipasang secara vertikal pada 4 (empat) sisi, sehingga membentuk ruangan persegiempat yang disebut ruang bakar. Fungsi tube wall adalah alat pemanas air dengan bidang yang luas sehingga mempercepat proses penguapan.

**2. Burner (Alat Pembakaran)**

Burner pada boiler dilengkapi dengan Nozzle dan Diffusor udara sehingga dengan kedua peralatan tersebut terjadi pengabutan bahan bakar dan udara bercampur untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna.

**3. Boiler Drum**

Boiler drum terbuat dari plat baja yang berbentuk silinder dan dipasang mendatar di atas rangkaian pipa-pipa pemanas. Fungsi Boiler Drum adalah untuk menampung

air pengisi dan uap basah dari Tube Wall sekaligus untuk pemisah antara uap dan air.

**4. Super heater (Pemanas Lanjut)**

Super Heater adalah suatu alat yang konstruksinya merupakan rangkaian pipapipa yang berbentuk spiral diletakkan di bagian atas ruang pembakaran. Fungsi dari Super Heater adalah untuk memanaskan uap basah menjadi uap kering.

**5. Economizer**

Economiser adalah suatu alat yang konstruksinya merupakan rangkaian pipapipa yang berbentuk spiral dan dipasang pada saluran gas bekas yang berfungsi untuk memanaskan air sebelum masuk ke Boiler Drum.

**6. Air heater (Pemanas Udara)**

Air Heater adalah suatu alat yang konstruksinya dapat dibuat dari pipa lurus yang disusun pada saluran gas bekas dan berfungsi untuk memanaskan udara pembakaran.

➤ **Komponen Pendukung Boiler**

**1. Forced Draft Fan**

Alat yang berupa fan (kipas) ini berfungsi untuk memasukkan udara pembakaran secara paksa ke dalam furnace, terpasang pada bagian ujung saluran air intake boiler dan digerakkan oleh motor listrik.

**2. MFO Heater**

MFO Heater merupakan alat yang berfungsi untuk memanaskan bahan bakar berupa MFO dengan tujuan menurunkan viskositas dari MFO. Hal ini perlu dilakukan karena MFO memiliki viskositas yang relatif tinggi (satu tingkat di bawah aspal) sehingga sulit untuk teratomisasi di burner. Dengan proses pemanasan maka viskositas MFO dapat diturunkan sehingga dapat teratomisasi dengan baik dan menghasilkan pembakaran yang baik.

**3. Air Preheat Coil**

Alat yang berfungsi untuk memanaskan udara sebelum memasuki Air Heater dengan sumber panas berasal dari air

Deaerator. Udara yang akan memasuki Air Heater harus dipanaskan terlebih dulu agar tidak terjadi thermal stress akibat perbedaan suhu yang ekstrim.

#### **4. Air Heater**

Air Heater merupakan alat pemanas udara, dimana panas diambil dari gas buang hasil pembakaran sebelum masuk ke cerobong (stack). Dengan pemanfaatan gas buang ini, maka dapat menghemat biaya bahan bakar sehingga bisa meningkatkan efisiensi pembakaran. Air Heater yang digunakan pada PLTU adalah tipe Ljungstrom. Tipe ini paling banyak digunakan di dunia karena performa dan ketahanannya yang telah teruji. Selain itu tipe ini dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama sebelum dilakukan overhaul. Perbaikan dan perawatan berkala mudah dilakukan pada Air Heater tipe ini karena desainnya yang sederhana. Air Heater terdiri dari hot end element dan cold end element. Air Heater yang digunakan di PLTU merupakan Air Heater jenis Regenerative, yaitu gas sisa pembakaran dilalukan pada sebuah selubung tertutup untuk memanaskan sebagian dari elemen air heater, dan elemen yang dipanaskan ini, diputar ke selubung yang lain dimana disini dilalukan udara yang akan dipanaskan, sehingga terjadi perpindahan panas secara konduksi.

#### **5. Burner**

Alat yang berfungsi untuk membakar campuran antara bahan bakar (fuel) dengan udara (air) di dalam ruang bakar (furnace) pada boiler.

#### **6. Gas Recirculating Fan**

Alat ini berfungsi untuk mengarahkan sebagian flue gas (gas sisa pembakaran) kembali ke furnace untuk meningkatkan efisiensi boiler.

#### **7. Soot Blower**

Sootblower merupakan peralatan tambahan boiler yang berfungsi untuk membersihkan kotoran yang dihasilkan dari proses pembakaran yang menempel pada pipa-pipa

wall tube, superheater, reheater, economizer, dan air heater. Tujuannya adalah agar perpindahan panas tetap berlangsung secara baik dan efektif. Sebagai media pembersih digunakan uap. Suplai uap ini diambil dari primary superheater melalui suatu pengaturan tekanan PVC yang diset pada tekanan 40 kg/cm<sup>2</sup>. Setiap sootblower dilengkapi dengan poppet valve untuk mengatur kebutuhan uap sootblower. Katup ini membuka pada saat sootblower dioperasikan dan menutup kembali saat lance tube dari sootblower tersebut mundur menuju stop.

- Dilihat dari cara kerja/mekanisme pengoperasiannya sootblower dibagi atas :
  - a. Short Retractable Sootblower / Furnace Wall Blower, digunakan untuk membersihkan pipa-pipa penguap (wall tube) pada daerah furnace.
  - b. Long Retractable Sootblower, digunakan untuk membersihkan pipa-pipa superheater, dan reheater.
  - c. Air Heater Sootblower, digunakan untuk membersihkan elemen-elemen airHeater.

## **8. Safety Valve**

Valve berfungsi sebagai pengaman ketika terjadi tekanan uap yang berlebih yang dihasilkan oleh boiler. Tekanan berlebih ini dapat terjadi karena panas boiler yang berlebihan atau adanya penurunan beban turbin secara drastis.

### **2.1.2 Turbin Uap**

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin dihubungkan baik secara langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung pada mekanisme yang digerakkan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, untuk pembangkit listrik, dan untuk transportasi.

Pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) kerja mekanis yang dilakukan oleh turbin dikonversikan menjadi energi listrik pada generator. Dari generator inilah daya listrik disuplai kepada konsumen. Kebutuhan konsumen akan daya listrik ini bervariasi dari waktu ke waktu yang menyebabkan beban mekanis yang dipikul oleh poros turbin turut bervariasi pula. Perubahan pada beban mekanis ini menyebabkan perubahan langsung pada kerja yang dilakukan oleh poros turbin.

Turbin dituntut harus mempunyai kemampuan untuk beroperasi dengan kestabilan yang cukup dalam jangka waktu yang luas dari keadaan tanpa beban hingga ke beban penuh. Karena adanya hubungan langsung antara daya yang dihasilkan turbin dengan aliran massa uap melalui turbin tersebut, maka setiap variasi beban pada terminal generator akan langsung mempengaruhi laju aliran uap, bertambah atau berkurang tergantung pada apakah beban tersebut bertambah besar atau mengecil.

Pada kondisi beban yang konstan ada hubungan yang tetap antara momen putar yang dibangkitkan oleh sudu-sudu gerak dengan jumlah uap yang mengalir melalui turbin. Jika beban berubah hubungan ini tidak dapat lagi dipenuhi karena momen putar yang dibangkitkan tidak lagi sesuai dengan beban yang dipikul, sehingga akan terjadi kenaikan atau penurunan putaran poros turbin yang sebenarnya tidak dikehendaki.

Dengan menggunakan suatu alat kontrol suplai uap, kecepatan putar poros turbin dapat dijaga tetap konstan pada nilai tertentu tanpa dipengaruhi oleh bervariasinya beban. Jumlah uap yang mengalir akan selalu sesuai dengan beban yang dipikul oleh poros turbin. Semakin besar beban yang dipikul maka aliran uap bertambah besar dan begitu pun sebaliknya. Jadi dapat dikatakan turbin akan mengkonsumsi uap sesuai dengan beban yang dipikul.



Gambar 2.3 Turbin Uap pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik

Spesifikasi Turbin Uap:

- Merk : Mitsubishi Heavy Industry Co.
- Type : C32-8.83/1.3 ( extraction condensing steam turbine)
- Kapasitas : 32000 KW
- Putaran : 3000 rpm
- Live steam press. : 8.83 Mpa
- Live steam temp. : 535 °C
- Extraction steam Press. : 1.3 Mpa

Bagian-bagian dari turbin uap sebagai berikut:

### 1. Sudu Turbin

Sudu yang digunakan adalah sudu reaksi aliran tunggal untuk HP Turbin dan sudu aliran ganda untuk LP Turbin. Sudu reaksi digunakan untuk turbin dengan kapasitas besar karena sudu tersebut mempunyai efisiensi yang tinggi.

Pada sudu reaksi, kecepatan uap relatif rendah akibat tekanan turun dan pengaruh efisiensi aerodinamik.

**2. Rotor**

Merupakan bagian dari turbin yang bergerak (*rotating*) berfungsi untuk mengekspansi aliran fluida berupa uap untuk menggerakkan generator. Rotor juga merupakan kedudukan dari kumpulan beberapa sudu-sudu gerak.

**3. Stator**

Merupakan bagian dari turbin yang diam (*statis*) berfungsi untuk mengarahkan aliran fluida menuju rotor stage berikutnya. Stator biasanya tergabung dengan rumah (casing)

**4. Poros/shaft**

merupakan bagian yang berputar yang digunakan untuk meneruskan putaran dari turbin ke generator untuk menghasilkan daya, poros ini tergabung dengan sudu putar (rotor)

**5. Casing**

merupakan bejana dimana rotor ditempatkan yang juga berfungsi sebagai pembatas pada sudu turbin. Casing mempunyai sebuah lubang pada rotor keluar seolah-olah menembus casing sehingga memungkinkan penempatan bantalan penunjang rotor diluar casing. Casing biasanya terdiri dari dua bagian yang terpisah yaitu casing atas (*cover*) dan casing bawah (*base*).

**6. Bantalan (*bearing*)**

Turbin memiliki dua buah bantalan pada masing-masing rotor dan satu buah trust bearing, dengan tipe pelumas paksa. Bantalan ini berfungsi sebagai penyangga rotor agar tetap stabil pada posisinya sehingga rotor dapat berputar dengan aman.

**7. *Turning Gear***

Saat turbin berhenti beroperasi, uap dengan temperatur rendah cenderung berkumpul di dalam silinder bagian bawah dan membuat rotor bagian bawah lebih cepat dingin dibanding bagian atas sehingga dapat menyebabkan distorsi. Untuk menghindari hal ini, turning gear digunakan untuk memutar poros turbin, poros turbin diputar perlahan hingga semua bagian rotor dingin.

#### 8. Pompa Minyak Pelumas

Dalam sistem pelumasan turbin terdapat beberapa pompa minyak pelumas guna menunjang operasi turbin uap, pompa-pompa tersebut diantaranya:

- **Main oil pump**, merupakan pompa minyak pelumas utama yang berfungsi sebagai pelumas bearing-bearing yang ada di turbin uap.
- **Auxillary oil pump**, merupakan pompa minyak pelumas bantu yang digunakan apabila Main Oil Pump mengalami masalah/kerusakan.
- **Turning oil pump**, merupakan pompa minyak pelumas yang digunakan untuk melumasi turning gear dan komponen lainnya saat turbin pertama kali dijalankan/start up ataupun saat akan shut down.
- **Emergency oil pump**, merupakan pompa minyak pelumas darurat yang digunakan saat MOP, AOP tidak dapat berfungsi.
- **Jacking Oil Pump**, adalah pompa yang digunakan untuk mengangkat poros turbin uap saat turbin pertama kali di operasikan/start up.

### **2.1.3 Kondensor**

Kondensor merupakan alat penukar kalor yang berfungsi untuk mengkondensasikan uap keluaran turbin. Uap setelah memutar turbin langsung mengalir menuju kondensor untuk diubah menjadi air (dikondensasikan), hal ini terjadi karena uap bersentuhan langsung dengan pipa-pipa (tubes) yang didalamnya dialiri oleh air pendingin. Oleh karena kondensor merupakan salah satu komponen utama yang sangat penting, maka kemampuan kondensor dalam mengkondensasikan uap keluaran turbin harus benar-benar diperhatikan, sehingga perpindahan panas antara fluida pendingin dengan uap keluaran turbin dapat maksimal dan pengkondensasian terjadi dengan baik.

Kondensor terdiri dari tube-tube kecil yang melintang. Pada tube-tube inilah air pendingin dari laut dialirkan. Sedangkan uap mengalir dari atas menuju ke bawah agar mengalami kondensasi atau pengembunan. Sebelum masuk kedalam kondensor, air laut biasanya melewati debris filter yang berfungsi untuk menyaring kotoran-kotoran ataupun lumpur yang terbawa air laut.

Agar uap dapat bergerak turun dengan lancar dari sudu terakhir turbin, maka vakum kondensor harus dijaga, karena dengan ada vakum pada kondensor akan membuat tekanan udara pada kondensor menjadi rendah. Dengan tekanan yang lebih rendah di kondensor, maka uap akan bisa bergerak dengan mudah menuju kondensor.



Gambar 2.4 Kondensor

#### 2.1.4 Pompa

Pompa merupakan peralatan untuk mengalirkan fluida dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Pompa pada pembangkit tenaga uap terdiri dari beragam jenis dan fungsi, salah satunya adalah *boiler feed pump*. *Boiler feed pump* menjadi bagian tidak terpisahkan dari sebuah pembangkit tenaga uap, dimana pompa ini memiliki fungsi untuk mensuplai air dalam proses pembakaran di dalam boiler. Air yang dimaksud merupakan penyubliman uap keluaran dari kondensor, fluida dalam kondisi uap membutuhkan energy yang lebih besar untuk dialirkan dibandingkan dalam kondisi cair. Pompa utama sebagai berikut:

a) *Condensate Extraction Pump (CEP)*

Merupakan pompa yang berfungsi untuk memompakan air kondensat menuju deaerator.

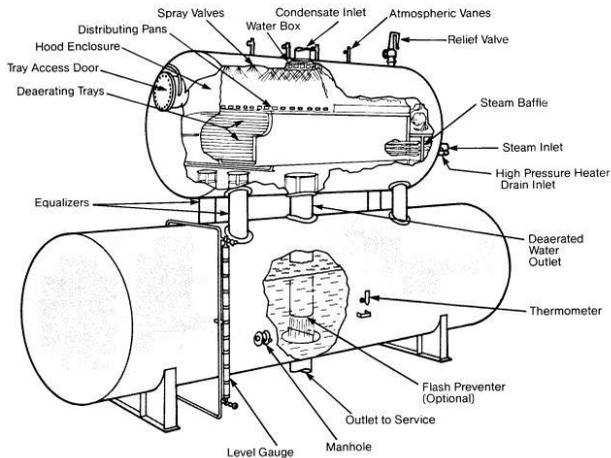
b) *Boiler Feed Pump* (BFP)

Merupakan pompa yang berfungsi untuk memompakan air umpan (*feedwater*) dari deaerator menuju LP economizer. Unit Batubara PT.Petrokimmia Gresik memiliki tiga buah pompa BFP, dimana satu buah beroperasi dan dua buah standby.

### 2.1.5 Deaerator

*Deaerator* adalah alat yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan oksigen atau gas-gas terlarut lainnya pada air umpan sebelum masuk ke boiler. *Deaerator* bekerja berdasarkan sifat oksigen yang kelutannya pada air akan berkurang dengan adanya kenaikan suhu. *Deaerator* terdiri dari dua drum, drum yang lebih kecil merupakan tempat pemanasan pendahuluan dan pembuangan gas-gas dari air umpan, sedangkan drum yang lebih besar merupakan tempat penampungan air umpan sebelum masuk ke boiler. Pada drum kecil terdapat *spray nozzle* yang berfungsi untuk menyemprotkan air umpan menjadi butiran-butiran air halus agar proses pemanasan dan pembuangan gas-gas lebih sempurna, dan gas-gas yang tidak terkondensasi dibuang ke atmosfer melalui saluran *vent* pada drum kecil.

Oksigen dan gas-gas terlarut dalam air umpan perlu dihilangkan, karena dapat menyebabkan senyawa oksida yang menyebabkan karat pada pipa dan peralatan pembangkit yang terbuat dari logam. Air jika bereaksi dengan karbondioksida terlarut dapat menyebabkan korosi lebih lanjut. Terdapat dua jenis *deaerator* yang sering digunakan yaitu tipe *Tray* dan tipe *Spray*.



Gambar 2.5 Deaerator

([http://cleanboiler.org/files/2015/12/Deaerator\\_Spray2-1.jpg](http://cleanboiler.org/files/2015/12/Deaerator_Spray2-1.jpg))

## 2.2. Tinjauan Termodinamika

### 2.2.1 Hukum Pertama Termodinamika Untuk Control Volume

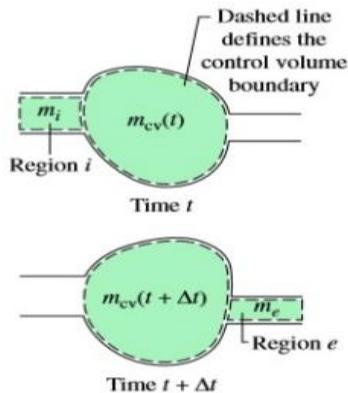
Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap, proses produksi banyak berhubungan dengan analisis termodinamika. Salah satu hukum termodinamika yang diaplikasikan adalah penerapan hukum pertama termodinamika untuk control volume pada alat-alat di unit PLTU. Hukum pertama termodinamika adalah hukum konservasi energi atau kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan ataupun dilenyapkan. Energi dari suatu sistem yang mengalami perubahan (proses) dapat bertambah atau berkurang oleh pertukaran dengan lingkungan dan diubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lain di dalam sistem itu. Sehingga dalam hukum ini, semua perubahan energi harus diperhitungkan.

Hukum pertama tidak menjelaskan apakah perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk lain berlangsung secara sempurna atau tidak. Keterbatasan ini nantinya akan dilengkapi oleh hukum kedua termodinamika.

Telah disebutkan bahwa untuk komponen pembangkitan oleh turbin uap pada unit PLTU, analisis yang digunakan berpedoman pada hukum pertama termodinamika untuk control volume sehingga proses di analisis pada volume tetap, energi dan massa dapat keluar dan masuk melewati boundary layer. Analisis Termodinamika untuk control volume juga tidak terlepas dari hukum kekekalan massa, karena jumlah massa yang masuk dan keluar control volume juga menentukan dalam proses konservasi energi.

Prinsip kekekalan massa dan energi untuk suatu control volume didasarkan pada dua persamaan dasar, yaitu :

- Persamaan yang didasarkan pada hukum konservasi massa



Gambar 2.6 *Control Volume* Konservasi Massa  
(Reff 6, hal. 122)

Dari Gambar di atas dapat diketahui bahwa dalam sebuah *control volume* pada waktu ( $t$ ) terjadi massa masuk yang diberi notasi  $m_i$  sementara di dalam *control volume* sudah terdapat massanya sendiri yang diberi notasi  $m_{cv}(t)$ . Pada saat waktu  $t + \Delta t$  massa di dalam *control volume* mengalami perubahan. Perubahan tersebut adalah terdapat massa keluar yang diberi notasi  $m_e$  dan massa di dalam *control volume* yang terperangkap diberi notasi  $m_{cv}(t + \Delta t)$ . Sehingga perubahan laju aliran massa dalam *control volume* per satuan waktu tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Laju perubahan} \\ \text{massa yang} \\ \text{terdapat dalam} \\ \text{control volume} \\ \text{pada waktu } t \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa masuk} \\ \text{total yang} \\ \text{melintasi} \\ \text{semua sisi} \\ \text{masuk saat} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{massa keluar} \\ \text{total yang} \\ \text{melintasi} \\ \text{semua sisi} \\ \text{keluar saat} \\ \text{waktu } t \end{array} \right]$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum i \dot{m} - \sum e \dot{m} \dots\dots\dots 2.1$$

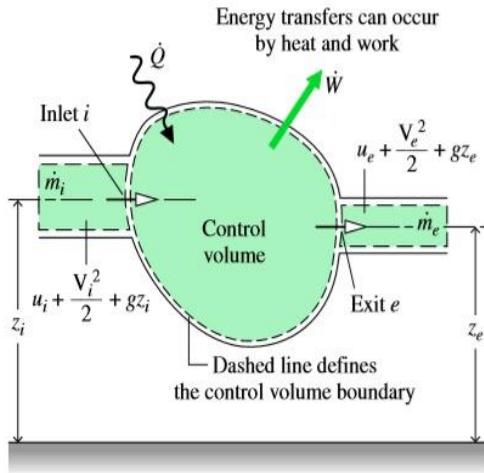
- Keadaan Steady

Dalam perhitungan teknik, sebuah system dapat diidealisasikan sebagai keadaan *steady*, yang berarti bahwa semua sifatnya tidak berubah menurut waktu. Untuk satu *control volume* dengan konservasi massa dalam keadaan *steady*, *properties* dari zat di dalam *control volume* terus menerus berubah, tetapi jumlah massa total yang ada pada setiap saat tetap konstan. Dengan demikian  $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$  dan persamaan 2.1 dapat disederhanakan menjadi:

$$0 = \sum i \dot{m} - \sum e \dot{m} \dots\dots\dots 2.2$$

Sehingga, laju aliran massa total yang masuk dan keluar *control volume* adalah sama.

- Persamaan yang didasarkan pada energi kekekalan energy



Gambar 2.7 *Control Volume* Konservasi Massa dan Energi (Reff 6, hal. 129)

Berdasarkan gambar di atas dan prinsip hukum konservasi energy yang diaplikasikan di control volume adalah :

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{c} \text{Laju} \\ \text{perubahan} \\ \text{energi yang} \\ \text{terdapat} \\ \text{dalam} \\ \text{control} \\ \text{volume} \\ \text{pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{k calor bersih} \\ \text{yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{masuk oleh} \\ \text{perpindahan} \\ \text{panas pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{bersih yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{keluar} \\ \text{dalam} \\ \text{bentuk} \\ \text{kerja} \\ \text{pada} \\ \text{waktu } t \end{array} \right] + \\
 & \left[ \begin{array}{c} \text{Laju energi} \\ \text{bersih yang} \\ \text{ditransfer} \\ \text{ke dalam} \\ \text{control} \\ \text{volume} \\ \text{yang} \\ \text{dibaawa} \\ \text{oleh laju} \\ \text{aliran massa} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Untuk aliran satu dimensi seperti pada gambar 2.2, persamaan konservasi energinya adalah

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left( u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left( u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \dots 2.3$$

$E_{cv}$  adalah notasi system di dalam *control volume* pada waktu  $t$  (sebelum terjadi perubahan).

Diketahui  $\dot{W}$  adalah kerja yang dikeluarkan oleh control volume. Adapun pada *control volume* terdapat 2 jenis kerja, yaitu kerja yang dihasilkan oleh *control volume* ( $\dot{W}_{cv}$ ) dan kerja yang dihasilkan system aliran massa masuk untuk mendorong massa ke dalam atau keluar system ( $pmv$ ), sehingga :

$$\dot{W} = \dot{W}_{cv} + pmv \dots \dots \dots 2.4$$

Maka persamaan 2.3 menjadi

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left( u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i + p_i v_i \right) - \dot{m}_e \left( u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e + p_e v_e \right) \dots\dots\dots 2.5$$

- Keadaan Steady

Dalam perhitungan teknik, sebuah sistem dapat diidealisasikan sebagai dalam keadaan *steady*, yang berarti bahwa semua sifatnya tidak berubah menurut waktu. Untuk satu *control volume* dengan konservasi energi dalam keadaan *steady*, *properties* dari zat di dalam *control volume* tidak berubah terhadap waktu sehingga  $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$ . Apabila diberikan tambahan analisis dengan konservasi massa pada keadaan *steady*  $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$  sehingga  $\dot{m}_i = \dot{m}_e$ . Maka persamaan 2.5 menjadi

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left( u_i + \frac{\overline{v_i^2}}{2} + gz_i + p_i v_i \right) - \dot{m}_e \left( u_e + \frac{\overline{v_e^2}}{2} + gz_e + p_e v_e \right) \dots\dots\dots 2.6$$

$\dot{Q}$  = kalor yang masuk bila bertanda positif dan keluar bila bertanda negatif. Secara matematis  $\Delta\dot{Q}$  dapat dicari dengan persamaan  $\Delta\dot{Q} = \dot{m}c_n (T_e - T_i)$ ,  $c_n$  adalah kalor spesifik yang besarnya bergantung pada proses yang berlangsung sesuai dengan tabel 2.1 dengan satuan  $\frac{kJ}{kg.K}$  (SI). Adapun  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa yang mempunyai satuan  $\frac{kg}{s}$  (SI).  $T$  adalah temperatur yang mempunyai satuan  $K$  (kelvin) atau bisa juga  $R$  (rankine) dan  $C$  (celcius) apabila berbentuk  $\Delta$  atau perbedaan temperatur.

$\dot{W}_{cv}$  = adalah kerja yang dilakukan oleh system bila bertanda positif dan kerja yang diterima oleh system bila bertanda negatif.

$\dot{m}.u = \dot{U}$  = adalah energy dalam yang merupakan fungsi temperature bagi gas ideal. Sementara gas, uap dan cairan yang non ideal terutama fungsi temperature tapi sedikit juga dipengaruhi tekanan. Adapun satuannya adalah :  $u = \frac{kJ}{kg}$  ;  $\dot{U} = \frac{kJ}{s}$  (SI).

$\dot{m} \cdot \frac{\overline{v^2}}{2}$  = adalah energy kinetic yang dimiliki massa keluar dan masuk *control volume*. Adapun satuannya adalah  $\overline{V} = \frac{m}{s}$  (SI).

$\dot{m}.g.z$  = adalah energy potensial dari massa masuk dan keluar *control volume*. Satuan dari  $g = \frac{m}{s^2}$  ;  $z = m$  (SI).

$\dot{m}.p.v$  = adalah energy aliran yang dibawa oleh massa masuk dan keluar *control volume*. Satuan dari  $P = Pa$  atau  $\frac{N}{m^2}$  ;  $v = volume\ spesifik = \frac{m^3}{kg}$  (SI).

➤ **Enthalpi**

Jumlah  $U + pV$  dan  $u + pv$  sering muncul bersama-sama dalam termodinamika. Oleh karena itu hubungan ini diberi nama tertentu, yaitu enthalpi dengan lambang  $H$  dan  $h$ , dimana  $h = enthalpi\ spesifik = \frac{H}{m}$ , jadi

$$H = U + pV \quad \dots\dots\dots 2.7$$

$$h = u + pv \quad \dots\dots\dots 2.8$$

apabila persamaan (2.4) dimasukkan ke persamaan 2.5 maka persamaan menjadi

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i (u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + p_i v_i) - \dot{m}_e (u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + p_e v_e) \quad \dots\dots\dots 2.9$$

Enthalpy dan energi adalah sifat (*properties*) fluida, yang berarti masing-masing mempunyai satu nilai tunggal untuk setiap keadaan tertentu fluida itu. Definisinya adalah

$$C_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \dots\dots\dots 2.10$$

$$C_p \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana  $c_p$  adalah kalor spesifik pada tekanan tetap dan  $c_v$  adalah kalor spesifik pada volume tetap. Keduanya mempunyai satuan  $\frac{kJ}{kg.K}$  (SI). Hubungannya satu sama lain adalah

$$c_p - c_v = R \dots\dots\dots 2.12$$

Dimana  $R$  adalah konstanta gas. Untuk gas ideal persamaan tersebut bisa menjadi

$$du = c_v dT \dots\dots\dots 2.13$$

$$du = c_p dT \dots\dots\dots 2.14$$

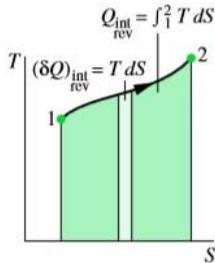
Dimana  $c_v - c_p$  adalah konstanta dan tidak bergantung pada suhu untuk gas beratom satu, seperti helium, tetapi meningkat dengan temperature untuk beratom dua seperti udara, dan lebih lagi untuk gas beratom tiga seperti  $CO_2$ , dsb. Untuk kalor spesifik tetap, atau bila perubahan temperature kecil, maka persamaan (2.13) dan (2.14) dapat dituliskan berikut :

$$\Delta u = c_v \Delta T \dots\dots\dots 2.15$$

$$\Delta h = c_p \Delta T \dots\dots\dots 2.16$$

➤ Entropi

Entropi adalah salah satu sifat termodinamika yang dapat didefinisikan sebagai suatu sifat yang menyatakan ketidakmampubalikan atau sebagai ukuran ketidakteraturan zat pada tingkat mikroskopik. Karena entropi merupakan sifat atau properties sehingga dapat dicari nilainya seperti sifat lainnya.



Gambar 2.8 T-S Diagram Perubahan Entropi  
(Reff 6, hal. 218)

Dari gambar di atas diketahui bahwa terjadi panas masuk yang digambarkan dalam T-S diagram dengan persamaan.

$$\partial Q = T dS \quad \dots\dots\dots 2.17$$

### 2.2.2 Hukum Kedua Termodinamika

Hukum kedua termodinamika memberikan batasan mengenai konversi beberapa bentuk energy menjadi bentuk lain. Ada dua bentuk energy yang palig banyak mendapatkan perhatian, yaitu kalor (*heat*) dan kerja (*work*). Sehingga hukum kedua termodinamika tidaklah membantah kesetaraan dalam konversi itu berlangsung. Kerja adalah komoditas yang penting. Hal ini disebabkan karena kerja dapat dikonversikan seluruhnya dan secara terus menerus menjadi kalor, tetapi sebaliknya kalor tidak dapat dikonversikan seluruhnya dan secara terus menerus menjadi kerja. Dengan kata lain kalor tidak seluruhnya tersedia untuk melakukan kerja secara terus- menerus, yaitu dalam siklus (walaupun mungkin dalam proses).

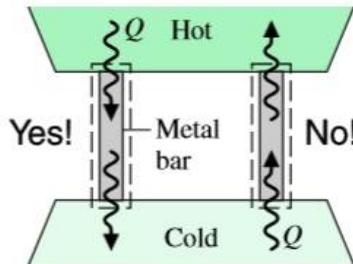
Bagian kalor yang tidak dapat dikonversikan menjadi kerja, disebut energy tak tersedia, harus dibuang sebagai kalor berderajat rendah setelah melakukan kerja. Cara lain untuk menyatakan hokum kedua adalah bahwa efisiensi thermal

pengubahan kalor menjadi kerja *heat engine* selalu kurang dari 100 persen.

Ada dua pernyataan terkenal untuk menggambarkan hukum kedua termodinamika, yaitu pernyataan Kelvin-Planck dan Clausius.

➤ Pernyataan Clausius

Sesuatu yang tidak mungkin pada suatu system untuk beroperasi pada sebuah keadaan yang menghasilkan peprindahan energy panas dari daerah yang dingin ke panas tanpa ada enegi lain.

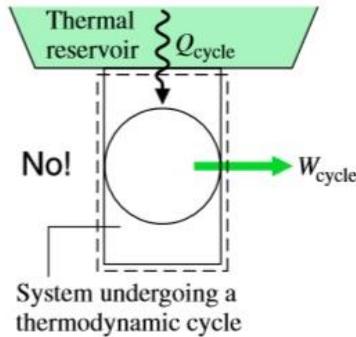


Gambar 2.9 Ilustrasi Pernyataan Clausius  
(Reff 6, hal. 178)

Gambar di atas menggambarkan maksud dari pernyataan Clausius. Sehingga perpindahan energy panas secara natural tidak mungkin terjadi dari daerah yang bertemperatur rendah ke temperature tinggi.

➤ Pernyataan Kelvin-Planck

Sesuatu yang tidak mungkin untuk sebuah system beroperasi di siklus termodinamika dan menghantarkan energy kerja ke lingkungan ketika menerima energy panas yang ditransfer hanya dari satu sumber panas.



Gambar 2.10 Ilustrasi Pernyataan Kelvin-Planck  
(Reff 6, hal. 178)

Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa tidak mungkin energy kalor dikonversi semua ke dalam energy kerja tanpa ada energy kalor yang dibuang. Sehingga efisiensi proses 100%.

Berkaitan dengan entropi, maka perubahan entropi setelah proses  $S_2$  dan sebelum proses  $S_1$  berdasarkan hukum termodinamika kedua adalah :

1. jika  $S_2 - S_1 > 0$  maka proses adalah irreversible (actual)
2. jika  $S_2 - S_1 = 0$  maka proses adalah reversible (ideal)
3. jika  $S_2 - S_1 < 0$  maka proses impossible atau tidak ada.

### 2.2.3 Konsep Irreversibilitas pada Pembangkitan oleh Turbin Uap PLTU

Proses mampu balik (reversible proses) juga disebut proses ideal. Adalah proses yang dapat berbalik sendiri menurut langkah yang persis sama dengan langkah yang semula, dan dengan demikian mengembalikan semua kalor dan kerja yang dipindahkan ke system atau lingkungan. Sementara, pada kenyataannya hal tersebut tidak ada. Sehingga yang ada adalah proses *Irreversibilitas*. (El Wakil, 1984)

Untuk proses dalam pembangkit listrik tenaga uap ada dua sumber *irreversibilitas*, yaitu *intern* dan *ekstern*.

➤ *Eksternally*

Sumber utama *irreversibilitas ekstern* adalah perpindahan kalor pada boiler dan condenser. Selain itu juga gesekan mekanik dalam bantalan mesin –mesin rotary.

➤ *Internally*

Sumber utama *irreversibilitas internally* adalah gesekan fluida di dalam komponen yang dilalui fluida, termasuk pipa, katup, *throttle* dan *mixing*.

### **2.3. Siklus Rankine pada Turbin Uap UBB PT.Petrokimia Gresik**

Siklus Rankine sebagai standar untuk pembangkit daya yang menggunakan uap. Siklus Rankine yang digunakan nyata dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dari pada siklus rankine ideal asli yang sederhana. Kerumitan tersebut merupakan modifikasi yang bertujuan untuk menjadikan siklus itu paling efisien untuk membangkitkan listrik dewasa ini.

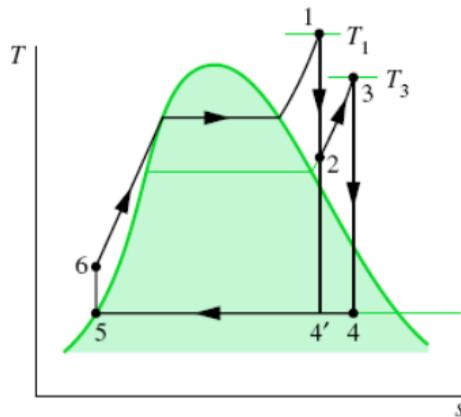
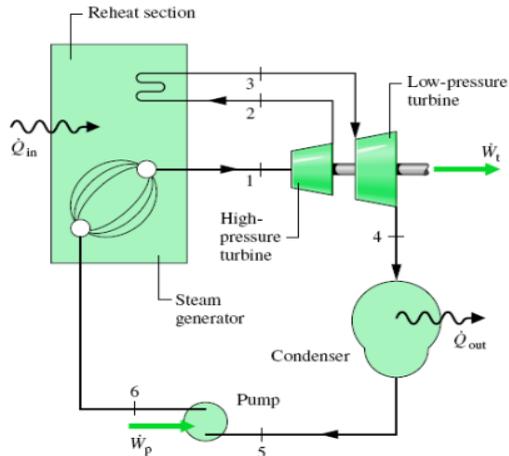
#### **2.3.1 Siklus Rankine Ideal**

Siklus rankine ideal yang umum digunakan di PLTU adalah sebagai berikut :

Siklus ini terdiri dari 4 proses, yaitu :

1. Proses 3 -4 : kompresi isentropic dalam pompa menuju ke kondisi 4 dalam daerah cairan hasil kompresi.
2. Proses 4 -1 : perpindahan kalor ke fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui boiler untuk menyelesaikan siklus.
3. Proses 1 -2 : ekspansi isentropic dari fluida kerja melalui turbin dari uap jenuh pada kondisi 1 hingga mencapai tekanan condenser

4. Proses 2-3 : perpindahan kalor dari fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui condenser dengan cairan jenuh pada kondisi 3



Gambar 2.11 Blok Diagram Siklus Rankine Ideal Pembangkitan oleh Turbin Uap (Reff 6, hal. 341)

### 2.3.2 Siklus Rankine Aktual UBB PT.Petrokimia Gresik

Telah disebutkan sebelumnya bahwa jumlah komponen dari siklus rankine actual lebih kompleks daripada yang ideal. Seperti gambar (2.14) , diketahui bahwa dari blok diagram tersebut terdapat beberapa tambahan komponen untuk menaikkan efisiensi siklus. Masing-masing komponen mempunyai peran sendiri-sendiri dalam menaikkan efisiensi siklus. Komponen yang digunakan antara lain:

1. *Superheater*

Sesuai dengan namanya, *superheater* mempunyai fungsi untuk menaikkan temperatur uap yang telah terbentuk di dalam water wall boiler. Sehingga didapatkan uap yang mempunyai temperature tinggi agar didapatkan kerja turbin yang besar ketika diekspansikan.

2. *Economizer*

Economiser adalah suatu alat yang konstruksinya merupakan rangkaian pipapipa yang berbentuk spiral dan dipasang pada saluran gas bekas yang berfungsi untuk memanaskan air sebelum masuk ke Boiler Drum.

3. *Desuperheater*

Adalah komponen boiler yang berfungsi untuk menurunkan temperature uap panas yang berasal dari superheater I sehingga temperature uap yang masuk ke superheater II sesuai dengan yang telah ditentukan.

4. *Trap*

Berguna untuk menurunkan tekanan dari fluida kerja tapi tidak merubah nilai enthalpinya. Sehingga  $h_i = h_e$ , hal ini terjadi karena kenaikan kecepatan akibat penyempitan dapat diabaikan akibat kembalinya luasan aliran seperti pada saat keadaan masuk.



Apabila persamaan dia atas dibagi dengan  $\dot{m}_1$  maka,

$$1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1} \dots\dots\dots 2.19$$

Jika fraksi massa untuk ekstraksi turbin diwakili oleh variable berikut

$$y = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

maka persamaan (2.19) menjadi

$$1 - y = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_1} \dots\dots\dots 2.20$$

Nilai dari y dapat diketahui dari analisis konversi energy dan massa pada Dearator dengan asumsi 1, 2, 3 dan  $\dot{Q}=0$  ;  $\dot{W} = 0$

Sehingga persamaan energinya menjadi

$$0 = y h_2 + (1 - y).h_7 - h_9$$

$$y = \frac{h_9 - h_7}{h_2 - h_7}$$

- Evaluasi Kerja Turbin

Dengan mengaplikasikan *control volume* pada kedua turbin dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kerja turbin didapat dengan

$$\dot{W}_t = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.21$$

Karena terjadi pengambilan massa uap untuk di distribusikan ke pabrik II maka masuk pada stage turbin selanjutnya beda seingga persamaan (2.21) menjadi

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_5) \dots\dots\dots 2.22$$

- Evaluasi Kalor Masuk

Dengan mengaplikasikan *control volume* pada boiler dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kalor masuk didapat dengan.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.23$$

Karena terdapat dua boiler yang beroperasi, yakni boiler A dan Boiler B sehingga persamaan (2.23) menjadi

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{13} \cdot (h_{13} - h_{11}) + \dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{12}) \dots\dots\dots 2.24$$

- Evaluasi Kerja Pompa

Dengan mengaplikasikan *control volume* pada pompa dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kerja pompa didapat dengan

$$\dot{W}_p = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \dots\dots\dots 2.25$$

Karena pompa mengolah fluida kerja liquid yang bisa diasumsikan bersifat *incompressible* ( $v = \text{constan}$ ) sehingga sesuai dengandefinisi kerja pada sub bab 2.1.1 bahwa  $\dot{W}_{cv} = -\int_i^e \dot{m} V dp$ . Apabila kedua ruas dibagi dengan  $\dot{m}$ . Maka persamaan menjadi

$$\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = -\int_i^e v dp$$

$$\frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{m}} = v(p_e - p_i)$$

Karena ada 2 pompa di dalam system sehingga persamaan (2.25) menjadi

$$\dot{W}_p = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_6) + (\dot{m}_{10}) \cdot (h_{10} - h_9) \dots\dots\dots 2.26$$

- Evaluasi Kalor Keluar

Dengan mengaplikasikan *control volume* pada *condenser* dan dengan menggunakan asumsi yang telah disebutkan maka kalor didapat dengan

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e$$

Sehingga,

$$\frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{m}} = (1 - y) (h_5 - h_6)$$

- Evaluasi Kerja Siklus

Beberapa parameter yang digunakan sebagai indicator unjuk kerja siklus Rankine adalah :

1. Kerja / Daya Netto,  $\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_t - \dot{W}_p$  atau  $w_{\text{net}} = w_t - w_p$
2. Laju Kalor masuk,  $q_{\text{in}}$
3. Efisiensi Thermal, dapat didefinisikan sebagai kerja bersih yang didapatkan dibagi dengan panas yang masuk ke siklus,  $\eta = \frac{w_t - w_p}{q_{\text{in}}}$   
 $\eta = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$
4. *Heat Rate* adalah panas yang masuk ke siklus dibagi dengan kerja bersih yang didapat

$$HR = \frac{q_{\text{in}}}{w_t - w_p}$$

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB III**

### **METODOLOGI**

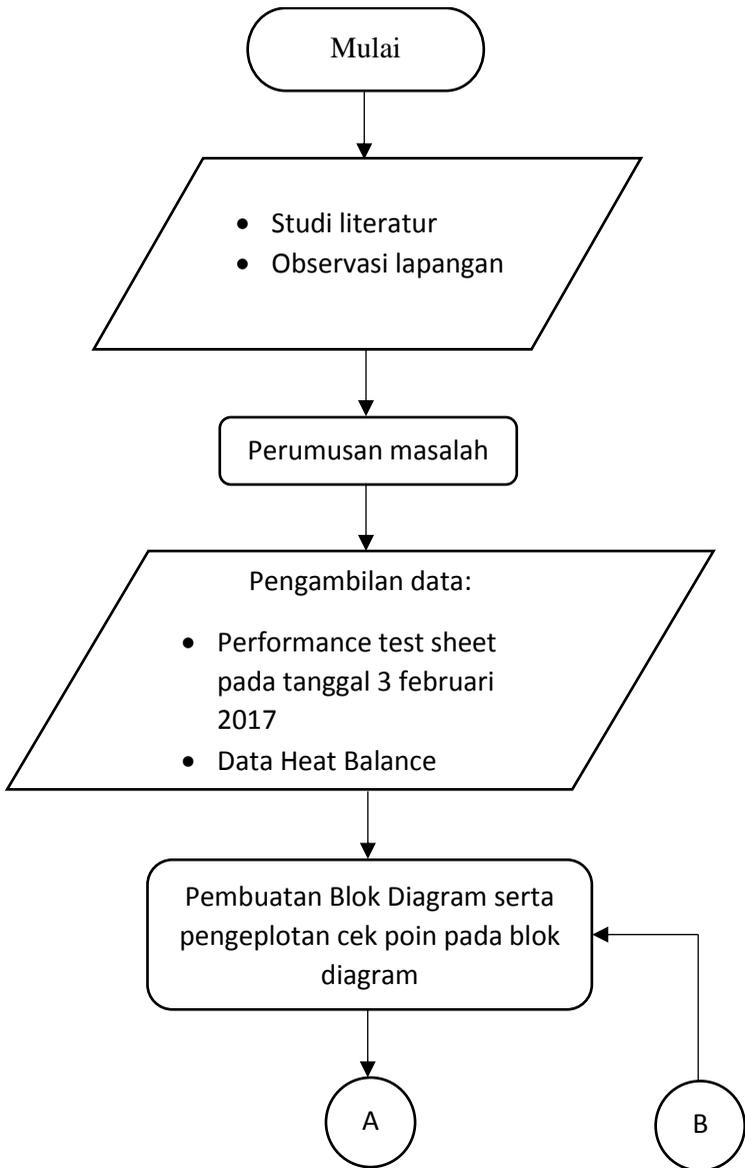
Untuk dapat mengetahui pengaruh variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap untuk kegiatan operasional pabrik II dan III terhadap performa siklus Rankine Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik maka diperlukan metode penulisan secara analitis dan matematis. Pada bab ini akan dibahas mengenai metodologi yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir.

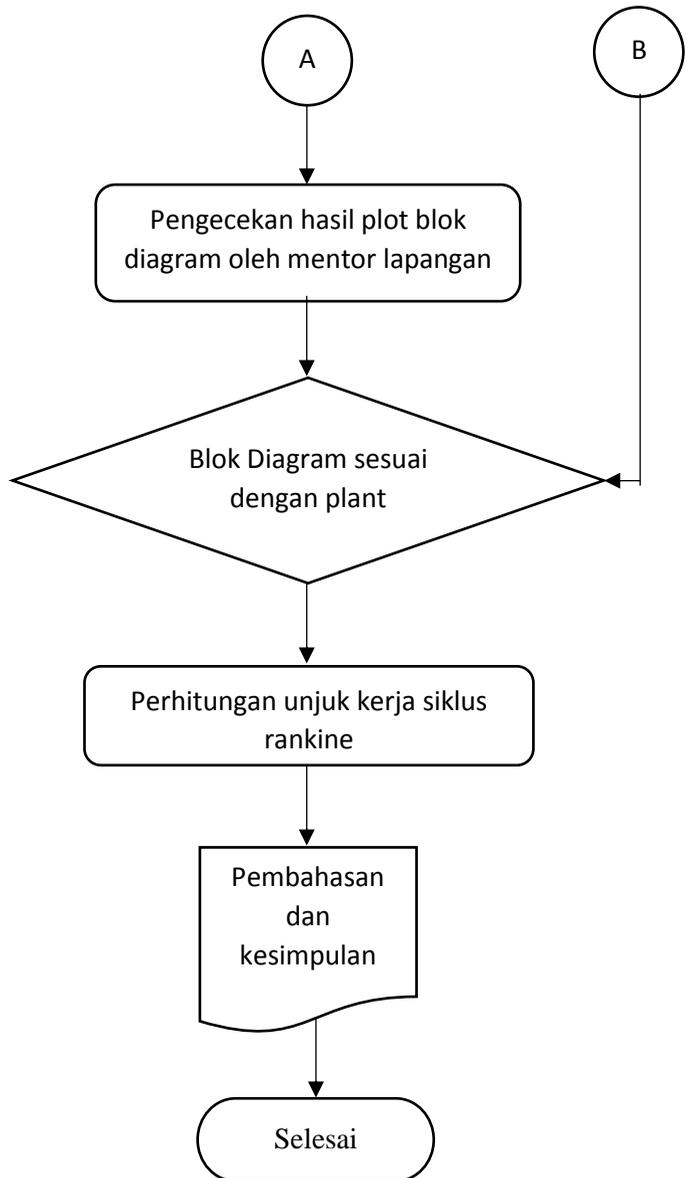
#### **3.1 Metode Penulisan Tugas Akhir**

Penulis melakukan studi literatur yang meliputi studi buku-buku/referensi yang digunakan dalam masa perkuliahan, studi di perpustakaan, studi di CCR (Central Control Room) Unit Batubara, studi di Candal HAR Pabrik III, serta diskusi dengan mentor maupun dengan dosen pembimbing. Selain itu untuk menambah referensi, penulis juga menggunakan media internet sebagai sarana untuk melengkapi sumber pengetahuan.

Dengan memahami permasalahan termodinamika yang berkaitan dengan siklus rankine melalui studi literatur, penulis lebih mengerti data-data apa saja yang akan diambil saat observasi lapangan. Data yang diperlukan yaitu data operasional unit batubara yang diperoleh di bagian Candal HAR III PT.Petrokimia Gresik, dan data Heat & Mass Balance yang diperoleh dari bagian OP UBB PT.Petrokimia Gresik.

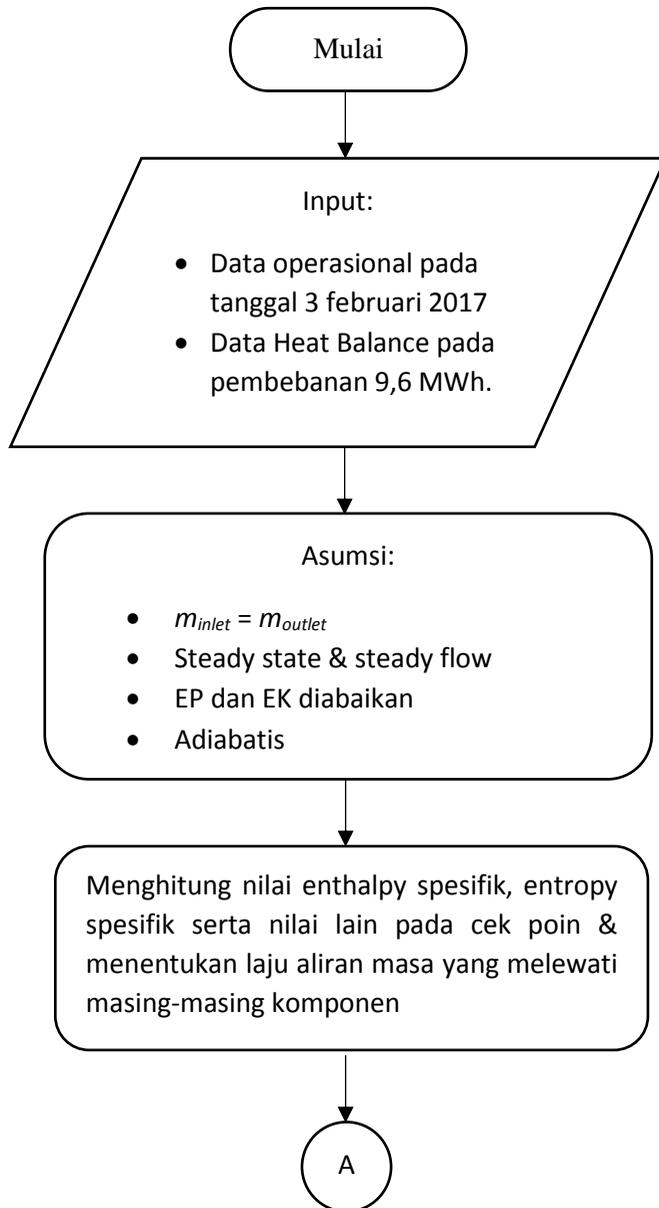
### 3.2 Diagram Alir Penelitian

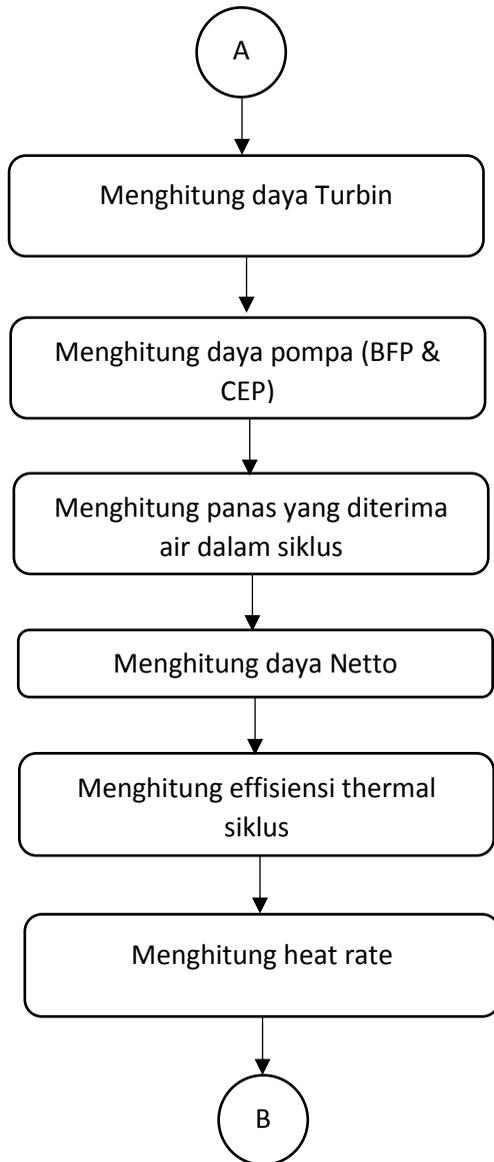


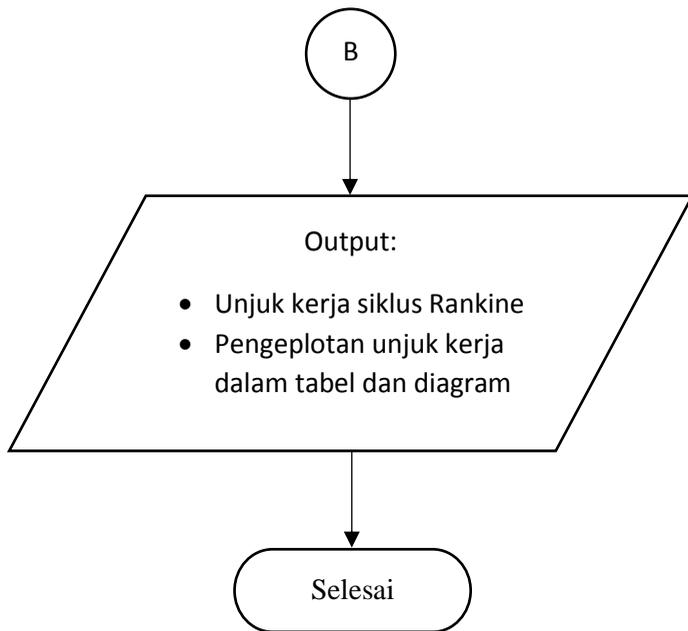


**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Diagram Alir Perhitungan







**Gambar 3.2** Diagram Alir Perhitungan

## **BAB IV**

### **PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN**

Pada bab berikut akan dijabarkan langkah-langkah perhitungan pengaruh variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III terhadap unjuk kerja siklus rankine unit Batubara (UBB) PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan:

1. Data histori performa unit Batubara PT.Petrokimia Gresik
2. Data *Mass & Heat Balance*.

#### **4.1. Data Yang Digunakan**

Data yang digunakan merupakan data yang diperoleh dari data operasional Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik pada tanggal 3 Februari 2017.

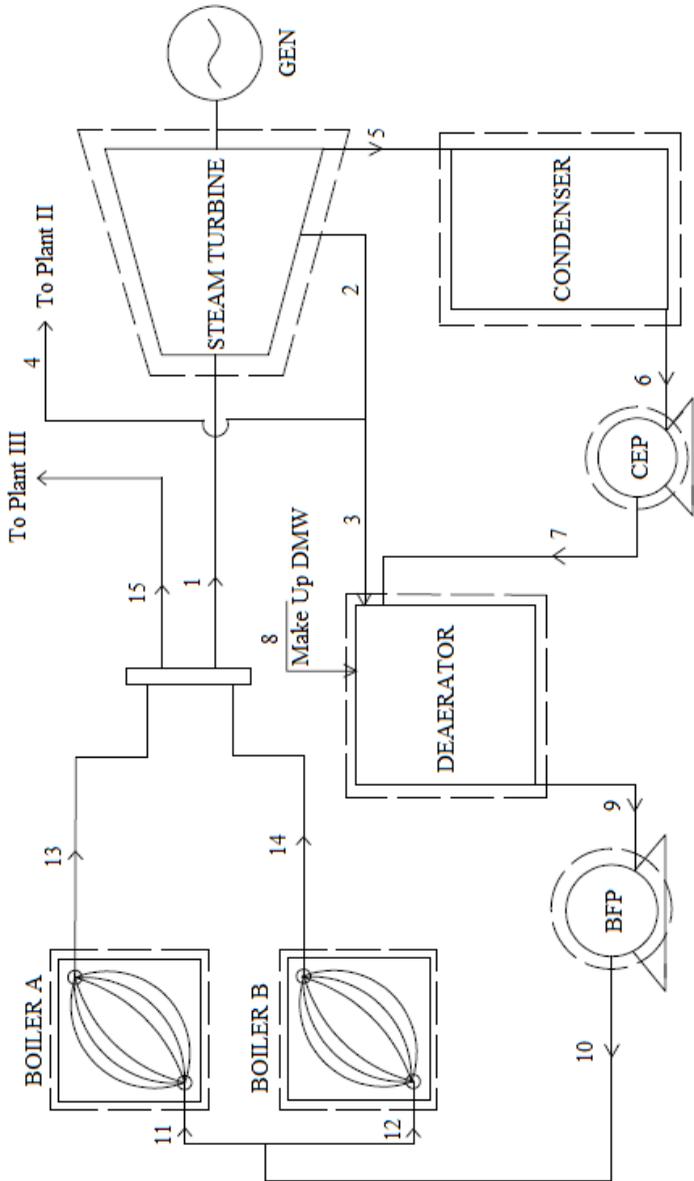
#### **4.2. Diagram Blok UBB PT.Petrokimia Gresik**

Diagram blok yang terlampir didasarkan pada penyederhanaan diagram blok pada Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik.

#### **4.3. Data operasional unit Batubara PT.Petrokimia Gresik pada tanggal 3 Februari 2017**

##### **4.3.1. Perhitungan Properties Pada Cek Point**

Penentuan nilai properties berupa tekanan dan temperatur pada masing-masing titik diperoleh dari tabel Performance Sheet yang didapat dari Candal OP unit Batubara PT.Petrokimia Gresik :



**Gambar 4.1** Diagram Blok UBB PT.Petrokimia Gresik

**Tabel 4.1** Kondisi Tekanan, Temperatur dan Mass Flow Rate pada masing-masing cek poin pada tanggal 3 februari 2017

Check Point	Keterangan	Kondisi	Nilai	$m \left(\frac{kg}{s}\right)$
1	Main Steam In	Press (kPa)	8200	13,333
		Temp (°C)	460	
2	Steam extraction	Press (kPa)	800	-
		Temp (°C)	301	
3	Steam to deaerator	Press (kPa)	400	0,829
		Temp (°C)	-	
4	Steam to plan II	Press (kPa)	500	-
		Temp (°C)	299	
5	Exhaust Steam	Press (kPa)	20.3	11,389
		Temp (°C)	55	
6	Condenser exit	Press (kPa)	8,322	11,389
		Temp (°C)	50	
7	Condenser Pump Exit	Press (kPa)	1190	11,389
		Temp (°C)	-	
8	Make up DMW	Press (kPa)	-	-
		Temp (°C)	-	
9	Deaerator exit	Press (kPa)	200	25,277
		Temp (°C)	91	
10	Outlet BFP	Press (kPa)	14500	25,277
		Temp (°C)	94	
11	Inlet boiler A	Press (kPa)	12800	13,889
		Temp (°C)	94	
12	inlet boiler B	Press (kPa)	12600	11,111
		Temp (°C)	94	
13	Outlet boiler A	Press (kPa)	8200	13,889
		Temp (°C)	479	
14	Outlet boiler B	Press (kPa)	8200	11,111
		Temp (°C)	506	

15	Steam to plant III	Press (kPa)	3600	11,111
		Temp (°C)	412	

- **Perhitungan Mass Flow Rate**

**m<sub>2</sub> (Mass flow rate steam extraction)**

$$m_2 = (m_1 - m_5)$$

$$m_2 = (13,333 - 11,389) \frac{kg}{s}$$

$$m_2 = 1,944 \frac{kg}{s}$$

**Total mass flow rate yang di distribusikan ke pabrik II dan III**

$$\begin{aligned} m_{\text{total to plant}} &= m_{15} + m_4 \\ &= m_{15} + (m_2 - m_3) \\ &= 11,111 \frac{kg}{s} + (1,944 - 0.829) \frac{kg}{s} \\ &= 12,226 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

**m<sub>8</sub> (Mass flow rate makeup demin water)**

$$m_8 = (m_{13} + m_{14} - m_{15} - m_4)$$

$$m_8 = (13,889 + 11,111 - 11,111 - 1,115) \frac{kg}{s}$$

$$m_8 = 12,774 \frac{kg}{s}$$

**4.3.2. Langkah Perhitungan**

Selanjutnya akan dilakukan beberapa langkah perhitungan secara termodinamika untuk mengetahui pengaruh variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III terhadap unjuk kerja siklus rankine unit Batubara PT.Petrokimia Gresik. Metode perhitungan akan didasarkan pada beberapa asumsi untuk menyederhanakan dan mempermudah pada proses perhitungan.

Asumsi:

1. Keadaan Steady State Steady Flow.
2. Tidak ada perpindahan kalor dan massa yang tidak dikehendaki ke lingkungan.
3. Energi Kinetik (EK) dan Energi Potensial (EP) diabaikan.
4. Proses berlangsung secara irreversible pada turbin dan pompa.
5. Berdasarkan heat balance mass flow ekstraksi uap yang masuk pabrik II semua beban sama.
6. Berdasarkan heat balance mass flow uap yang masuk pabrik III melalui outlet boiler semua beban sama.

- **Perhitungan Kondisi Pada Cek Poin**

Analisis properties dari masing-masing cek poin dengan menggunakan tabel termodinamika dari “Department of Mechanical Engineeirng, Michigan State University” karangan Craig W. Somerton yang terdapat pada bagian lampiran.

### **Cek Poin 1 (Superheated vapor)**

Titik 1 adalah keadaan dimana uap utama (Main Steam) masuk turbin uap. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_1 = 8200$  kPa dan temperatur  $T_1 = 460^\circ\text{C}$  akan dicari nilai enthalpy spesifik (h) dan entropy spesifik (s), dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan nilai  $h_1$  dan  $s_1$ .

$$h_1 = 3343 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 6,5754 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

### **Cek Poin 2 (Superheated vapor)**

Titik 2 adalah keadaan dimana uap utama diekstraksi dari turbin uap untuk di distibusikan ke pabrik II untuk keperluan operasional pabrik dan sebagai pemanas air di dearator. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_2= 800$  kPa dan  $T_2= 301$  °C. akan dicari nilai enthalpy spesifik (h)  $h_2$

$$h_2 = 3058,5 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 3 (Superheated vapor)**

Titik 3 adalah keadaan dimana uap utama hasil ekstraksi dari turbin uap di distibusikan ke deaerator sebagai pemanas demin water. Dengan asumsi  $T_2=T_3$  dan dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_3 = 400$  kPa. akan dicari nilai enthalpy spesifik (h)  $h_3$

$$h_3 = 3068,8 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 4 (Superheated Vapor)**

Titik 4 adalah keadaan dimana uap utama hasil ekstraksi dari turbin uap di distibusikan ke pabrik II untuk keperluan operasional pabrik. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_4= 500$  kPa dan temperatur  $T_4= 299$  °C akan dicari nilai enthalpy spesifik (h)  $h_4$

$$h_4 = 3062,2 \frac{kJ}{kg}$$

### Cek Poin 5 (liquid vapor mixture)

Titik 5 merupakan keadaan dimana uap yang telah digunakan untuk memutar poros turbin (exhaust steam) dikeluarkan. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $p_5 = 20,3$  kPa dan temperatur  $T_5 = 55$  °C akan dicari nilai enthalpy spesifik (h) dengan menggunakan metode ekstrapolasi maka didapatkan nilai  $h_5$ .

$$h_5 = 2061,56 \frac{kJ}{kg}$$

### Cek Poin 6 (Saturated Liquid)

Titik 6 adalah keadaan keluar kondensor hotwell dimana pada titik ini, uap air telah dibuang panasnya dengan cara dikondensasikan di dalam kondensor. Keluar kondensor fase fluida menjadi cair jenuh. Dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $T_6 = 50$  akan dicari nilai enthalpy spesifik (h), dan volume spesifik (v) pada titik 6.

$$h_6 = 209,33 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_6 = 0,0010121 \frac{m^3}{kg}$$

### Cek Poin 7 (Compressed Liquid)

Pada titik ini merupakan keadaan keluar *Condensate Extraction Pump* (CEP) dimana air kondensat hasil kondensasi dimampatkan/dikompresi untuk dialirkan menuju Deaerator. Dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $p_7 = 1190$  kPa dan asumsi volume spesifik  $v_7 = v_6$  dikarenakan fluida dianggap

incompressible akan dicari nilai enthalpy spesifik ( $h$ ) pada titik 7. Dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka didapatkan nilai  $h_7$  sebagai berikut.

$$h_7 = h_6 + v_6 \cdot (p_7 - p_6)$$

$$h_7 = 209,33 \frac{kJ}{kg} + 0,0010121 \frac{m^3}{kg} \cdot (1190 - 8,323) \text{ kPa} \times \frac{kN}{kPa \cdot m^2} \times \frac{kJ}{kN \cdot m}$$

$$h_7 = 210,52 \frac{kJ}{kg}$$

### Cek Poin 8 (Saturated Liquid)

Titik 8 adalah keadaan dimana air demin (demin water) di tambahkan kedalam deaerator untuk menggantikan massa uap air yang di distribusikan ke Pabrik II dan III , agar menjaga siklus dapat beroperasi sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Jumlah massa yang ditambahkan dapat dihitng dengan persamaan berikut.

$$m_8 = ( m_{13} + m_{14} - m_{15} - m_4 )$$

$$m_5 = ( 13,889 + 11,111 - 11,388 - ) \frac{kg}{s}$$

$$m_5 = 13,612 \frac{kg}{s}$$

### Cek Poin 9 (Saturated Liquid)

Pada titik ini merupakan keadaan dimana air kondensat keluar dari deaerator. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni temperatur  $T_9 = 91 \text{ }^\circ\text{C}$  akan dicari nilai enthalpy spesifik ( $h$ ), dan

volume spesifik ( $v$ ) pada titik 9. Dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan nilai  $h_9$  dan  $v_9$  sebagai berikut.

$$h_9 = 381,13 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_9 = 0,0010367 \frac{m^3}{kg}$$

### **Cek Poin 10 (Compressed Liquid)**

Pada titik ini merupakan keadaan keluar Boiler Feed Pump (BFP) dimana air kondensat dimampatkan/dikompresi untuk dialirkan menuju Boiler A dan Boiler B. Dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $p_{10} = 14500$  kPa dan asumsi volume spesifik  $v_{10} = v_9$  dikarenakan fluida dianggap incompressible akan dicari nilai enthalpy spesifik ( $h$ ) pada titik 10. Dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka didapatkan nilai  $h_{10}$  sebagai berikut.

$$h_{10} = h_9 + v_9 \cdot (p_{10} - p_9)$$

$$h_{10} = 382,13 \frac{kJ}{kg} + 0,0010367 \frac{m^3}{kg} \cdot (14500 - 200) \text{ kPa} \times \frac{kN}{kPa \cdot m^2} \times \frac{kJ}{kN \cdot m}$$

$$h_{10} = 395,95 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 11 (Compressed liquid)**

Pada titik 11 ini merupakan keadaan dimana air kondensat yang telah dimampatkan akan masuk ke Boiler A Dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $p_{11} = 12800$  kPa dan asumsi volume

spesifik  $v_{11}=v_9$  dikarenakan fluida dianggap incompressible akan dicari nilai enthalpy spesifik (h) pada titik 11. Dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka didapatkan nilai  $h_{11}$  sebagai berikut.

$$h_{11} = h_9 + v_9 \cdot (p_{11} - p_9)$$

$$h_{11} = 382,13 \frac{kJ}{kg} + 0,0010367 \frac{m^3}{kg} \cdot (12800 - 200) \text{ kPa} \times \frac{kN}{kPa \cdot m^2} \times \frac{kJ}{kN \cdot m}$$

$$h_{11} = 394,19 \frac{kJ}{kg}$$

### Cek Poin 12 (Compressed liquid)

Pada titik 12 ini merupakan keadaan dimana air kondensat yang telah dimampatkan akan masuk ke Boiler B. Dengan menggunakan data properties yakni tekanan  $p_{12} = 12600$  kPa dan asumsi volume spesifik  $v_{12} = v_9$  dikarenakan fluida dianggap incompressible akan dicari nilai enthalpy spesifik (h) pada titik 12. Dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka didapatkan nilai  $h_{12}$  sebagai berikut.

$$h_{12} = h_9 + v_9 \cdot (p_{12} - p_9)$$

$$h_{12} = 382,13 \frac{kJ}{kg} + 0,0010367 \frac{m^3}{kg} \cdot (12600 - 200) \text{ kPa} \times \frac{kN}{kPa \cdot m^2} \times \frac{kJ}{kN \cdot m}$$

$$h_{12} = 393,98 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 13 (superheated vapor)**

Titik 13 adalah keadaan dimana uap utama (Main Steam) keluar dari boiler A. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_{13}= 8200$  kPa dan temperatur  $T_{13}= 479$  °C akan dicari nilai enthalpy spesifik (h), dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan nilai  $h_{13}$ .

$$h_{13} = 3339 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 14 (superheated vapor)**

Titik 14 adalah keadaan dimana uap utama (Main Steam) keluar dari boiler B. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_{14}= 8200$  kPa dan temperatur  $T_{14}= 506$  °C akan dicari nilai enthalpy spesifik (h), dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan nilai  $h_{14}$ .

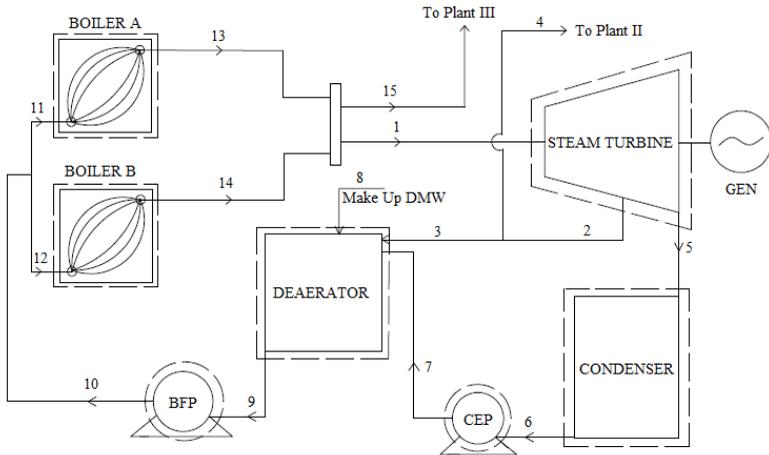
$$h_{14} = 3406,9 \frac{kJ}{kg}$$

### **Cek Poin 15 (Superheated Vapor)**

Titik 15 adalah keadaan dimana uap utama didistribusikan menuju pabrik III untuk keperluan operasional pabrik. Dari tabel dengan menggunakan data properties yakni tekanan sebesar  $p_{15}= 3600$  kPa dan temperatur  $T_{15}= 412$  °C akan dicari nilai enthalpy spesifik (h), dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan nilai  $h_{15}$ .

$$h_{15} = 3248,2 \frac{kJ}{kg}$$

**4.4. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III melalui outlet boiler dan ekstraksi turbin uap (Variasi I)**



**Gambar 4.2** blok diagram Variasi I

- **Perhitungan Daya Turbin**

Pada blok diagram yang terdapat pada lampiran terdapat ekstraksi massa uap yang di distribusikan ke pabrik II. Adapun persamaan untuk menghitung kerja turbin adalah sebagai berikut:

$$\frac{Wt}{m_1} = (h_1 - h_2) + \frac{m_5}{m_1} (h_2 - h_5)$$

$$\frac{Wt}{m_1} = (3343 - 3058,5) \frac{kJ}{kg} + \frac{11,389 \frac{kg}{s}}{13,333 \frac{kg}{s}} \cdot (3058,5 - 2061,56) \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 13,333 \frac{kg}{s} \times 1136,082 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 15,147 \text{ MW}$$

- **Perhitungan Daya Pompa**

Pada blok diagram yang terdapat pada lampiran terdapat dua jenis pompa yaitu BFP (Boiler Feed Pump) dan CEP (Condensate Extraction Pump). Adapun daya dari masing-masing pompa dan daya total pompa adalah sebagai berikut :

- BFP (Boiler Feed Pump)

$$W_{BFP} = m_{10} \cdot \{ v_9 ( P_{10} - P_9 ) \}$$

$$W_{BFP} = 25,277 \frac{kg}{s} \{ 0,0010367 \frac{m^3}{kg} (14500 - 200) \text{ kPa} \}$$

$$W_{BFP} = 0,3746 \text{ MW}$$

- CEP (Condensate Extraction Pump)

$$W_{CEP} = m_7 \cdot \{ v_6 ( P_7 - P_6 ) \}$$

$$W_{CEP} = 11.389 \frac{kg}{s} \{ 0,0010121 \frac{m^3}{kg} \cdot (1190 - 8,323) \text{ kPa} \}$$

$$W_{CEP} = 0,0135 \text{ MW}$$

- Daya Total Pompa

$$W_{TP} = ( W_{BFP} + W_{CEP} )$$

$$W_{TP} = ( 0,3746 + 0,0135 ) \text{ MW}$$

$$W_{TP} = 0,388 \text{ MW}$$

- **Kalor Yang Diberikan**

Perhitungan panas yang dimaksud di sini adalah panas yang diterima oleh air ketika di dalam Boiler A dan Boiler B. Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$Q_{in} = m_{13} \cdot ( h_{13} - h_{11} ) + m_{14} \cdot ( h_{14} - h_{12} )$$

$$Q_{in} = 11,111 \frac{kg}{s} ( 3406,9 - 393,98 ) \frac{kJ}{kg} + 13,888 \frac{kg}{s} ( 3339 - 394,19 ) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{in} = 33,476 \text{ MW} + 40.897 \text{ MW}$$

$$Q_{in} = 74,373 \text{ MW}$$

- **Daya Bersih Yang Dihasilkan Oleh Siklus**

$$W_{net} = W_{TT} - W_{TP}$$

$$W_{net} = ( 15,147 - 0,388 ) \text{ MW}$$

$$W_{net} = 14,759 \text{ MW}$$

- **Efisiensi Siklus:**

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{(14,759)MW}{(74,373)MW} \times 100 \%$$

$$\eta = 0,1984 \times 100 \%$$

$$\eta = 19,84 \%$$

- **Heat Rate ( HR )**

$$HR = \frac{Q_{in}}{W_{net}}$$

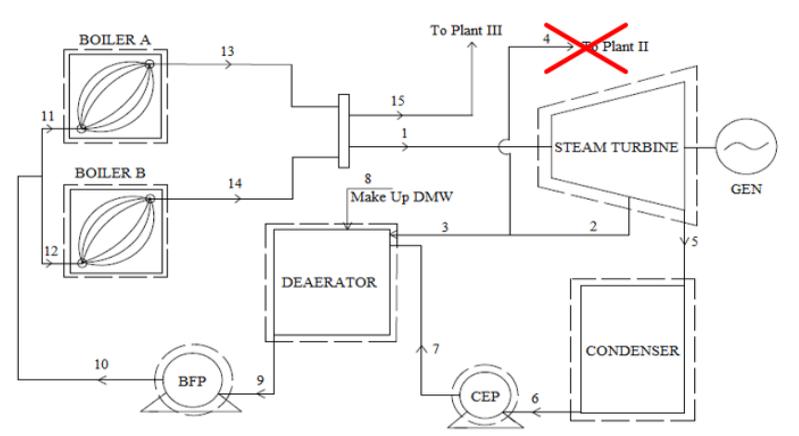
$$HR = \frac{(74,373) MW}{(14,759) MW}$$

$$HR = 5,039$$

**Tabel 4.2** Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap melalui outlet boiler dan ekstraksi turbin uap

Parameter unjuk kerja siklus rankine	
$W_{net}$ (MW)	14,759
$Q_{in}$ (MW)	74,373
$\eta$ thermal (%)	19,84
Heat Rate (HR)	5,039

**4.5. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III hanya melalui outlet boiler (Variasi II)**



**Gambar 4.3** blok diagram Variasi II

• **Perhitungan Daya Turbin**

Dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya melalui bypass outlet boiler maka tidak ada massa uap yang di bypass dari ekstraksi turbin sehingga  $m_1$  berubah menjadi  $m_1'$  sebagaimana persamaan berikut:

$$m_1' = (m_1 - m_4)$$

$$m_1' = (13,333 - 1,115) \frac{kg}{s}$$

$$m_1' = 12,218 \frac{kg}{s}$$

Adapun persamaan untuk menghitung kerja turbin adalah sebagai berikut:

$$\frac{W_t}{m_{1'}} = (h_1 - h_2) + \frac{m_5}{m_{1'}} (h_2 - h_5)$$

$$\frac{W_t}{m_{1'}} = (3343 - 3058,5) \frac{kJ}{kg} + \frac{11,389 \frac{kg}{s}}{12.218 \frac{kg}{s}} \cdot (3058,5 - 2061,56) \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 12,218 \frac{kg}{s} \times 1213,796 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 14,83 \text{ MW}$$

- **Perhitungan Daya Pompa**

Pada blok diagram yang terdapat pada lampiran terdapat dua jenis pompa yaitu BFP (Boiler Feed Pump) dan CEP (Condensate Extraction Pump). Adapun daya dari masing-masing pompa dan daya total pompa adalah sebagai berikut :

➤ BFP (Boiler Feed Pump)

$$W_{\text{BFP}} = m_{10} \cdot \{ v_9 (P_{10} - P_9) \}$$

$$W_{\text{BFP}} = 25,277 \frac{kg}{s} \{ 0,0010367 \frac{m^3}{kg} (14500 - 200) \text{ kPa} \}$$

$$W_{\text{BFP}} = 0,3746 \text{ MW}$$

➤ CEP (Condensate Extraction Pump)

$$W_{\text{CEP}} = m_7 \cdot \{ v_6 (P_7 - P_6) \}$$

$$W_{\text{CEP}} = 11.389 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left\{ 0,0010121 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot (1190 - 8,323) \text{ kPa} \right\}$$

$$W_{\text{CEP}} = 0,0135 \text{ MW}$$

➤ Daya Total Pompa

$$W_{\text{TP}} = ( W_{\text{BFP}} + W_{\text{CEP}} )$$

$$W_{\text{TP}} = ( 0,3746 + 0,0135 ) \text{ MW}$$

$$W_{\text{TP}} = 0,388 \text{ MW}$$

- **Kalor Yang Diberikan**

Perhitungan panas yang dimaksud di sini adalah panas yang diterima oleh air ketika di dalam Boiler A dan Boiler B. Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$Q_{\text{in}} = m_{13} \cdot ( h_{13} - h_{11} ) + m_{14} \cdot ( h_{14} - h_{12} )$$

$$Q_{\text{in}} = 11,111 \frac{\text{kg}}{\text{s}} ( 3406,9 - 393,98 ) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 13,888 \frac{\text{kg}}{\text{s}} ( 3339 - 394,19 ) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{in}} = 33,476 \text{ MW} + 40.897 \text{ MW}$$

$$Q_{\text{in}} = 74,373 \text{ MW}$$

- **Daya Bersih Yang Dihasilkan Oleh Siklus**

$$W_{\text{net}} = W_{\text{TT}} - W_{\text{TP}}$$

$$W_{\text{net}} = ( 14,83 - 0,388 ) \text{ MW}$$

$$W_{\text{net}} = 14,442 \text{ MW}$$

- **Efisiensi Siklus:**

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{( 14,442 ) \text{ MW}}{( 74,373 ) \text{ MW}} \times 100 \%$$

$$\eta = 0,1941 \times 100 \%$$

$$\eta = 19,41 \%$$

- **Heat Rate ( HR )**

$$\text{HR} = \frac{Q_{\text{in}}}{W_{\text{net}}}$$

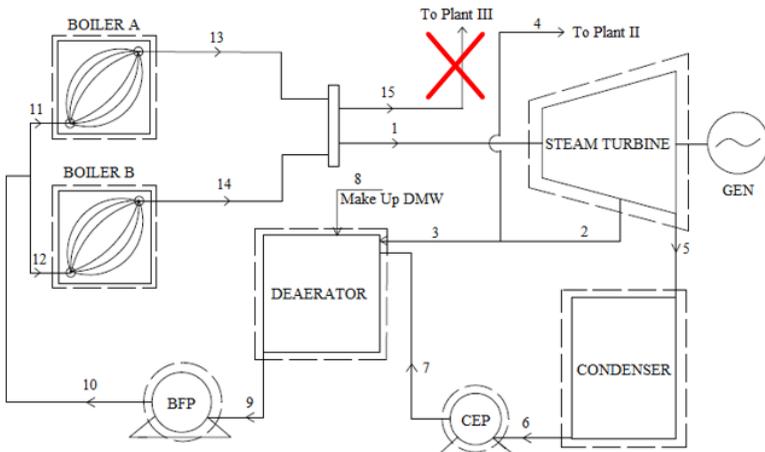
$$\text{HR} = \frac{( 74,373 ) \text{ MW}}{( 14,442 ) \text{ MW}}$$

$$\text{HR} = 5,149$$

**Tabel 4.3** Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap melalui hanya outlet boiler

Parameter unjuk kerja siklus rankine	
$W_{net}$ (MW)	14,442
$Q_{in}$ (MW)	74,373
$\eta_{thermal}$ (%)	19,42
Heat Rate (HR)	5,149

**4.6. Perhitungan unjuk kerja siklus rankine dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya melalui ekstraksi turbin uap (Variasi III)**



**Gambar 4.4** blok diagram Variasi III

- **Perhitungan Daya Turbin**

Dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya melalui bypass ekstraksi turbin uap maka tidak

ada massa uap yang di distribusikan lewat bypass outlet boiler sehingga  $m_1$  berubah menjadi  $m_1''$  sebagaimana persamaan berikut:

$$m_1'' = (m_1 + m_{15})$$

$$m_1'' = (13,333 + 11,111) \frac{kg}{s}$$

$$m_1'' = 24,444 \frac{kg}{s}$$

Adapun persamaan untuk menghitung kerja turbin adalah sebagai berikut:

$$\frac{Wt}{m_1''} = (h_1 - h_2) + \frac{m_5}{m_1''} (h_2 - h_5)$$

$$\frac{Wt}{m_1''} = (3343 - 3058,5) \frac{kJ}{kg} + \frac{11,389 \frac{kg}{s}}{24,444 \frac{kg}{s}} \cdot (3058,5 - 2061,56) \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 24,444 \frac{kg}{s} \times 748,996 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = 18,308 \text{ MW}$$

- **Perhitungan Daya Pompa**

Pada blok diagram yang terdapat pada lampiran terdapat dua jenis pompa yaitu BFP (Boiler Feed Pump) dan CEP (Condensate Extraction Pump). Adapun daya dari masing-masing pompa dan daya total pompa adalah sebagai berikut :

- BFP (Boiler Feed Pump)

$$W_{\text{BFP}} = m_{10} \cdot \{ v_9 ( P_{10} - P_9 ) \}$$

$$W_{\text{BFP}} = 25,277 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left\{ 0,0010367 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (14500 - 200) \text{ kPa} \right\}$$

$$W_{\text{BFP}} = 0,3746 \text{ MW}$$

➤ CEP (Condensate Extraction Pump)

$$W_{\text{CEP}} = m_7 \cdot \{ v_6 ( P_7 - P_6 ) \}$$

$$W_{\text{CEP}} = 11.389 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left\{ 0,0010121 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot (1190 - 8,323) \text{ kPa} \right\}$$

$$W_{\text{CEP}} = 0,0135 \text{ MW}$$

➤ Daya Total Pompa

$$W_{\text{TP}} = ( W_{\text{BFP}} + W_{\text{CEP}} )$$

$$W_{\text{TP}} = ( 0,3746 + 0,0135 ) \text{ MW}$$

$$W_{\text{TP}} = 0,388 \text{ MW}$$

• **Kalor Yang Diberikan**

Perhitungan panas yang dimaksud di sini adalah panas yang diterima oleh air ketika di dalam Boiler A dan Boiler B. Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$Q_{\text{in}} = m_{13} \cdot ( h_{13} - h_{11} ) + m_{14} \cdot ( h_{14} - h_{12} )$$

$$Q_{in} = 11,111 \frac{kg}{s} (3406,9 - 393,98) \frac{kJ}{kg} + 13,888 \frac{kg}{s} (3339 - 394,19) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{in} = 33,476 \text{ MW} + 40.897 \text{ MW}$$

$$Q_{in} = 74,373 \text{ MW}$$

- **Daya Bersih Yang Dihasilkan Oleh Siklus**

$$W_{net} = W_{TT} - W_{TP}$$

$$W_{net} = (18,308 - 0,388) \text{ MW}$$

$$W_{net} = 17,92 \text{ MW}$$

- **Efisiensi Siklus:**

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{(17,92) \text{ MW}}{(74,373) \text{ MW}} \times 100 \%$$

$$\eta = 0,2409 \times 100 \%$$

$$\eta = 24,09 \%$$

- **Heat Rate ( HR )**

$$HR = \frac{Q_{in}}{W_{net}}$$

$$HR = \frac{(74,373) MW}{(17,92) MW}$$

$$HR = 4,15$$

**Tabel 4.4** Tabel parameter unjuk kerja siklus rankine dengan kondisi pendistribusian laju aliran massa uap hanya melalui ekstraksi turbin uap

Parameter unjuk kerja siklus rankine	
$W_{net}$ (MW)	17,92
$Q_{in}$ (MW)	74,373
$\eta_{thermal}$ (%)	24,09
Heat Rate (HR)	4,15

#### 4.7. Rekap Perhitungan Unjuk Kerja Siklus Rankine Pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III

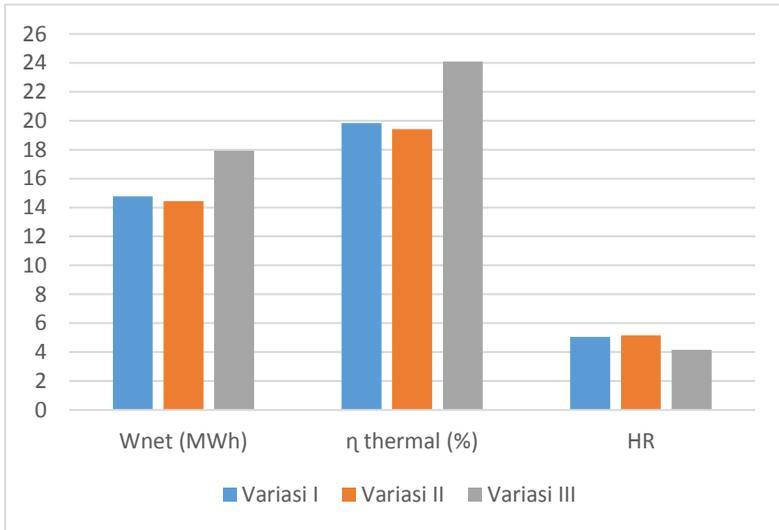
Hasil perhitungan pengaruh variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III terhadap unjuk kerja siklus rankine berikutnya ditampilkan dalam bentuk tabel seperti dibawah:

**Tabel 4.5** Tabel Rekap Perhitungan Unjuk Kerja Siklus Rankine dengan variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap

Distribusi mass flow rate	$W_{net}$ (MW)	$Q_{in}$ (MW)	$\eta_{thermal}$	HR	Total batubara (Ton)
Variasi I	14,759	74.373	19,84	5,039	477
Variasi II	14,442	74.373	19,42	5,149	477
Variasi III	17,92	74.373	24,09	4,15	477

#### 4.8. Grafik Unjuk Kerja Siklus Rankine pada variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap

Hasil dari perhitungan pengaruh variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III terhadap unjuk kerja siklus rankine dapat di plot pada grafik dibawah:



**Gambar 4.5** Grafik unjuk kerja siklus rankine variasi kondisi pendistribusian laju aliran massa uap

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.2. Kesimpulan**

Dari hasil perhitungan dan analisis kondisi turbin uap pada unit batubara PT.Petrokimia Gresik yang di bahas pada bab IV dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Turbin uap pada unit batubara PT.Petrokimia Gresik menghasilkan kerja paling optimal terdapat pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya melalui ekstraksi turbin yakni 18,308 MW
2. Efisiensi siklus rankine unit batubara PT.Petrokimia Gresik paling optimal terdapat pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya lewat ekstraksi turbin yakni 24,09%
3. Heat rate paling optimal pada siklus rankine unit batubara PT.Petrokimia Gresik terdapat pada kondisi pendistribusian laju aliran massa uap ke pabrik II dan III sepenuhnya lewat outlet boiler yakni 5,149

#### **5.2. Saran**

Berdasarkan proses perhitungan di bab 4 dan analisa, diberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sebagai berikut:

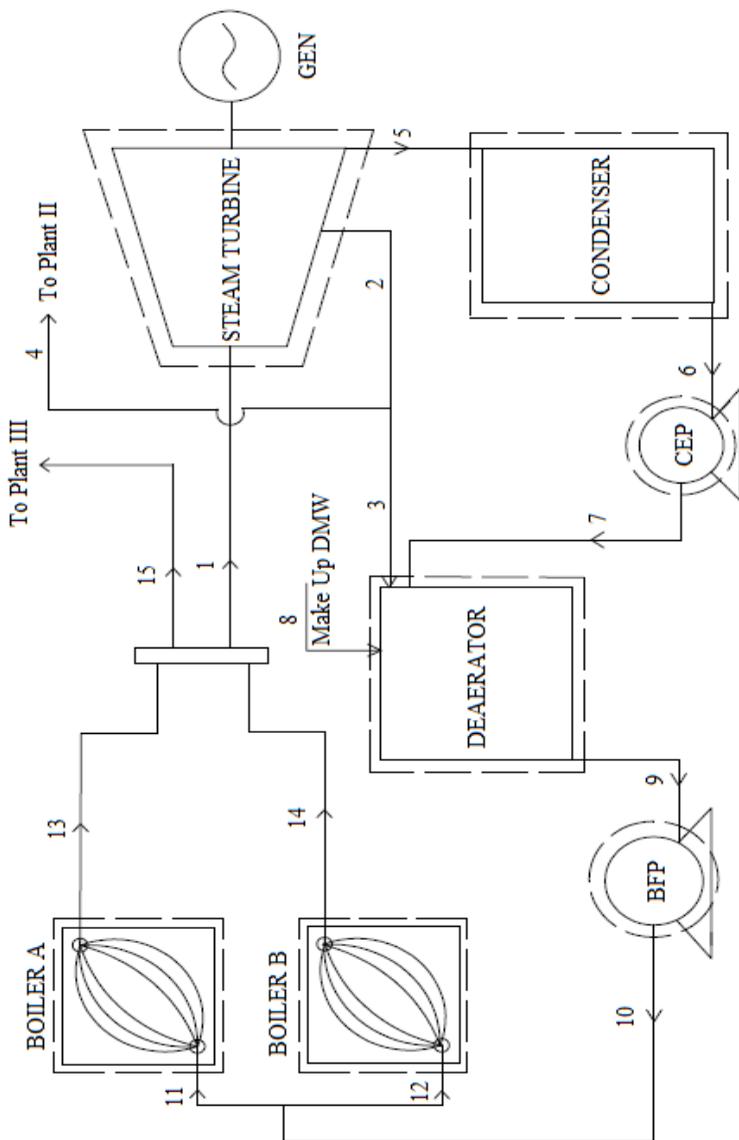
1. Diharapkan untuk lebih dilengkapi data kondisi uap pada titik-titik yang kelengkapan data kurang. Agar untuk hasil perhitungan dalam penelitian selanjutnya bisa lebih akurat.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

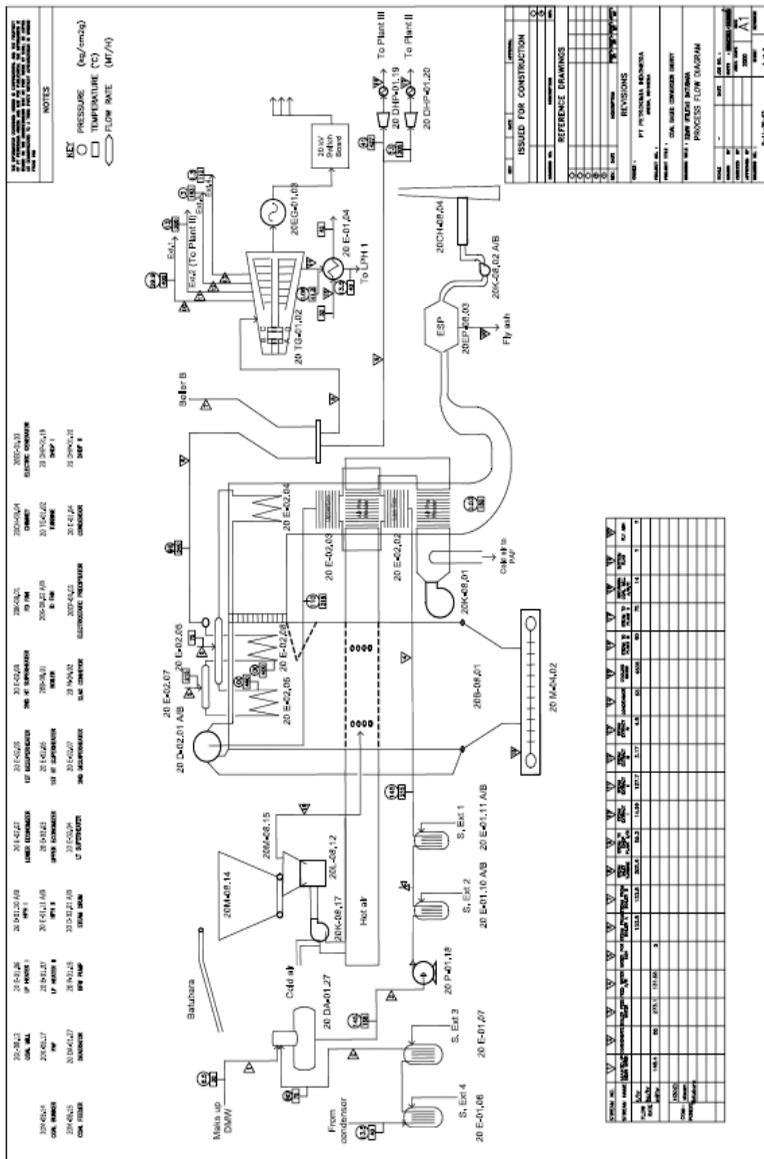
## DAFTAR PUSTAKA

1. Borgnakke, Claus dan Richard E Sontag. 2009. *“Fundamentals of Thermodynamics”*. Seventh Edition. John Wiley & Sons Inc. United States of America.
2. El-Wakil, MM. 1984. *“Power Plant Technology”*. First Edition. McGraw-Hill. United States of America.
3. Nag, Dr PK. 2002. *“Power Plant Engineering”*. Second Edition. McGraw-Hill. United States of America.
4. Nugroho, Yulianto Sulisty (2004). *“Termodinamika Teknik Jilid 1”*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
5. Nugroho, Yulianto Sulisty & Surjosatyo, Adi (2004). *“Termodinamika Teknik Jilid 2”*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
6. Moran, Michael J dan Howard N Shapiro. 2006. *“Fundamentals of Engineering Thermodynamics”*. Fifth Edition. John Wiley & Sons Inc. United Kingdom.
7. Somerton, Craig W. 2012. *“Phase Change Substance Property Tables in SI Units”*. Michigan State University. United States.

LAMPIRAN 1: Diagram Blok UBB PT.Petrokimia Gresik



## LAMPIRAN 2: Heat Balance UBB PT.Petrokimia Gresik



## LAMPIRAN 3: Konversi Satuan

### Conversion Factors

#### Area ( $A$ )

$$1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ cm}^2 = 1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in.}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in.}^2$$

$$1 \text{ in.}^2 = 6.4516 \text{ cm}^2 = 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$$

#### Conductivity ( $k$ )

$$1 \text{ W/m-K} = 1 \text{ J/s-m-K}$$

$$= 0.577789 \text{ Btu/h-ft-}^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/h-ft-R} = 1.730735 \text{ W/m-K}$$

#### Density ( $\rho$ )

$$1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lbm/ft}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$$

$$1 \text{ lbm/ft}^3 = 16.01846 \text{ kg/m}^3$$

#### Energy ( $E, U$ )

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N-m} = 1 \text{ kg-m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf-ft}$$

$$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$$

$$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ lbf-ft} = 1.355818 \text{ J}$$

$$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$$

$$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$$

$$= 778.1693 \text{ lbf-ft}$$

#### Force ( $F$ )

$$1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$$

$$1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N (1 kgf)}$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448222 \text{ N}$$

#### Gravitation

$$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

$$g = 32.17405 \text{ ft/s}^2$$

#### Heat capacity ( $C_p, C_v, C$ ), specific entropy ( $s$ )

$$1 \text{ kJ/kg-K} = 0.238846 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg-K}$$

#### Heat flux (per unit area)

$$1 \text{ W/m}^2 = 0.315098 \text{ Btu/h-ft}^2$$

$$1 \text{ Btu/h-ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$$

## LAMPIRAN 4: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh (Tabel Temperature)

**TABLE A-2** Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

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

LAMPIRAN 5: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh  
(Tabel Temperature)

TABLE A-2 (Continued)

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

Source: Tables A-2 through A-5 are extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

LAMPIRAN 6: Tabel Termodinamika Sifat dari Cair Jenuh  
(Tabel Tekanan)

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

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 7: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

**TABLE A-4** Properties of Superheated Water Vapor

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$ )				$p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$ )				
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194
$p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$ )				$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C}$ )				
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C}$ )				$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$ )				
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

## LAMPIRAN 8: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

**TABLE A-4** (Continued)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 5.0 \text{ bar} = 0.50 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 151.86^\circ\text{C}$ )				$p = 7.0 \text{ bar} = 0.70 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 164.97^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.2729	2572.5	2763.5	6.7080
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656	0.2847	2599.8	2799.1	6.7880
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.2999	2634.8	2844.8	6.8865
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307	0.3292	2701.8	2932.2	7.0641
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865	0.3574	2766.9	3017.1	7.2233
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308	0.3852	2831.3	3100.9	7.3697
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660	0.4126	2895.8	3184.7	7.5063
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.4397	2960.9	3268.7	7.6350
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152	0.4667	3026.6	3353.3	7.7571
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5070	3126.8	3481.7	7.9299
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.5738	3298.5	3700.2	8.1956
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.6403	3476.6	3924.8	8.4391
$p = 10.0 \text{ bar} = 1.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 179.91^\circ\text{C}$ )				$p = 15.0 \text{ bar} = 1.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391
$p = 20.0 \text{ bar} = 2.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 212.42^\circ\text{C}$ )				$p = 30.0 \text{ bar} = 3.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 233.90^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0850	2788.4	3043.4	6.6245
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

## LAMPIRAN 9: Tabel Termo Sifat dari Uap Air Superheat

**TABLE A-4** (Continued)

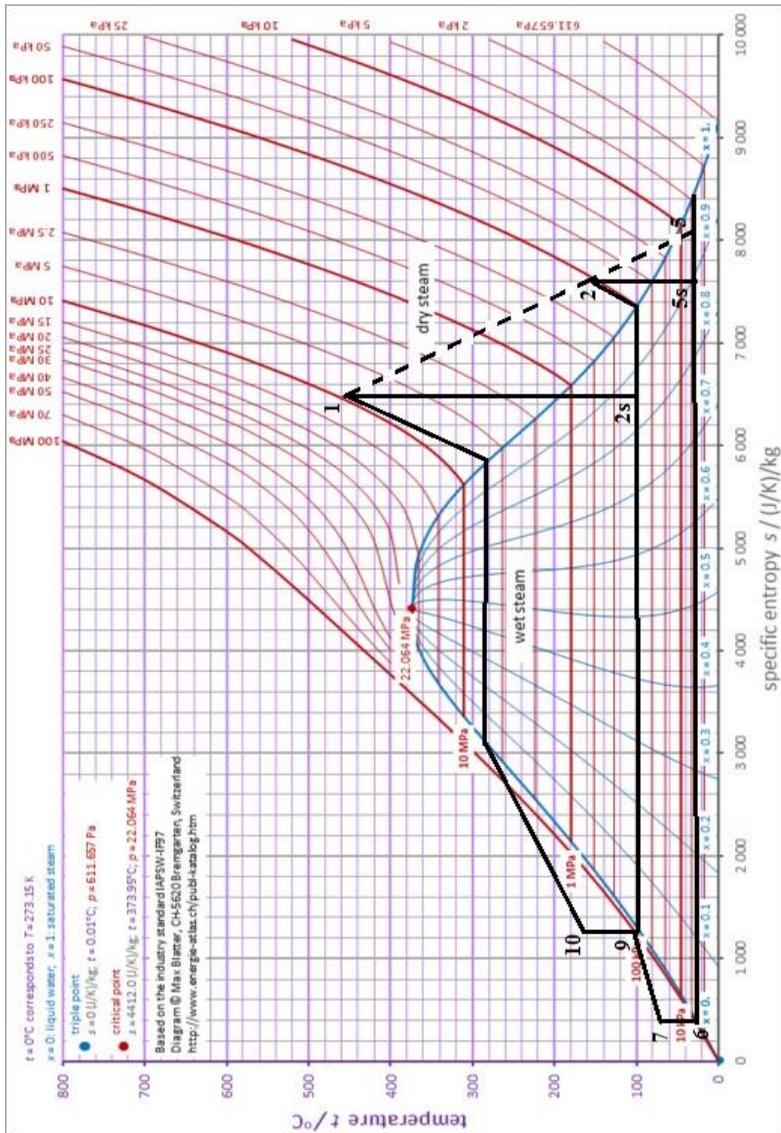
$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 40 \text{ bar} = 4.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C}$ )					$p = 60 \text{ bar} = 6.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C}$ )			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190
$p = 80 \text{ bar} = 8.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C}$ )					$p = 100 \text{ bar} = 10.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$ )			
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
$p = 120 \text{ bar} = 12.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C}$ )					$p = 140 \text{ bar} = 14.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C}$ )			
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

## LAMPIRAN 10: Tabel Termo Sifat dari Cair (Air) Terkompresi

**TABLE A-5** Properties of Compressed Liquid Water

$T$ °C	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$ )								
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bar} = 7.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$ )								
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945
40	1.0045	166.64	174.18	.5696	1.0034	166.35	176.38	.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
$p = 150 \text{ bar} = 15.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 342.24^\circ\text{C}$ )								
20	.9950	83.06	97.99	.2934	.9928	82.77	102.62	.2923
40	1.0013	165.76	180.78	.5666	.9992	165.17	185.16	.5646
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656	1.0199	330.40	350.80	1.0624
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242	1.0678	580.69	602.04	1.7193
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
$p = 250 \text{ bar} = 25 \text{ MPa}$								
20	.9907	82.47	107.24	.2911	.9886	82.17	111.84	.2899
40	.9971	164.60	189.52	.5626	.9951	164.04	193.89	.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741
$p = 300 \text{ bar} = 30.0 \text{ MPa}$								

# LAMPIRAN 11: t-s Diagram Siklus Rankine UBB PT.Petrokimia Gresik



LAMPIRAN 12: Data operasional UBB PT.Petrokimia Gresik  
tanggal 3 februari 2017

Panel sheet boiler

**Boiler A**

		LOG BOOK PANEL BOILER A & B				Tanggal : 03-02-17								
		UNIT UTILITAS BATUBARA - DEPARTEMEN PRODUKSI III B				Terbitan : 20 April 2015								
		Nomor Dokumen : LB-48-2001				Revisi :								
		06.00		14.00		22.00		24.00						
BOILER A														
Steam	Mpa/°C	8.2 / 47.9	8.2 / 46.3	8.3 / 46.7	8.0 / 47.5									
BFW	Mpa/°C	12.8 / 9.9	12.6 / 11.9	12.6 / 12.0	12.6 / 11.4									
Furn/Flue gas	°C/°C	6.91 / 11.8	6.13 / 12.5	6.09 / 12.6	6.32 / 12.6									
Hot Air / O <sub>2</sub>	°C/%	331 / 8.1	333 / 9.5	343 / 7.8	345 / 8.3									
Totaliser	FQ		8 Jam	Flow	FQ		8 Jam	Flow	FQ		24 Jam	Flow		
	Ton		T/j		Ton		T/j		Ton		T/j			
Steam	50780		397	50	51179	399	52	5590	411	47	57692	1203	50	
BFW	50509		410	50	50919	410	52	51343	424	48	57448	1238	52	
Coal Feeder	A	3079		40	5.2	3186	42	5.1	3156	40	5.1	3165	121	5.4
	B	4317		40	5.2	4356	39	5.2	4396	40	5.0	4406	119	5.6
	C													
Total Batubara	80				81			80			240			
Solar			m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>			
Bottom Slug			Box		Box		Box		Box		Box			
Test Firing Solar	Jam :		106 / 107 / 108 / 109											

**Boiler B**

BOILER B														
Steam	Mpa/°C	8.2 / 50.6	8.2 / 49.6	8.3 / 50.2	8.1 / 50.1									
BFW	Mpa/°C	12.6 / 9.9	12.5 / 11.9	12.3 / 12.1	12.5 / 11.5									
Furn/Flue gas	°C/°C	6.99 / 18.1	6.53 / 18.2	6.81 / 18.1	6.61 / 18.1									
Hot Air / O <sub>2</sub>	°C/%	381 / 8.7	373 / 8.9	372 / 8.3	372 / 8.5									
Totaliser	FQ		8 Jam	Flow	FQ		8 Jam	Flow	FQ		24 Jam	Flow		
	Ton		T/j		Ton		T/j		Ton		T/j			
Steam	38273		311	40	38588	315	40	38946	358	45	39041	998	40	
BFW	38600		328	40	38930	330	40	39296	366	46	39393	1039	40	
Coal Feeder	D	2577		39	5.9	2597	20	5.7			49			
	E	3191		42	5.9	3229	38	5.2	3269	40	5.5	3280	120	5.1
	F	3124				3141	17	5.4	3102	41	5.4	3193	69	9.3
Total Batubara	81				85			81						
Solar			m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>			
Bottom Slug			Box		Box		Box		Box		Box			
Test Firing Solar	Jam :		106 / 107 / 108 / 109											





## BIODATA PENULIS



Penulis tugas akhir ini bernama Imam Syafi'i. Tugas Akhir ini diselesaikan sebagai persyaratan untuk kelulusan D-III di Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS. Penulis dilahirkan di Gresik, 16 Oktober 1995, merupakan anak keempat dari enam bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Dharma Wanita Gresik, SD Negeri Roomo Gresik, SMP Negeri 3 Gresik, dan SMA Negeri 1 Manyar, Gresik. Pada tahun 2014 Penulis diterima di Jurusan D-III Teknik Mesin FTI-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2114 030 062. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan dan bergabung dalam organisasi. Organisasi dan kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Staff Departemen Ristek HMDM tahun 2015-2016, Koor Distrik kakak pendamping Gerigi ITS 2016. PT.Petrokimia Gresik merupakan tempat pengambilan data TA penulis di system utilitas Unit Batubara PT.Petrokimia Gresik.

Untuk mengetahui informasi tentang penulis dapat melalui email: [imsyaf62@gmail.com](mailto:imsyaf62@gmail.com)