

# **PENELITIAN**

## **DAMPAK PERUBAHAN TEKANAN VAKUM TERHADAP EFISIENSI TERMAL DAN PEMAKAIAN BAHAN BAKAR PADA PROSES KERJA KONDENSOR**



**Oleh :**

**ZEIN MUHAMAD**

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BANDAR LAMPUNG  
2021**



**UNIVERSITAS BANDAR LAMPUNG**  
**FAKULTAS TEKNIK**

Jl. Hi. Zainal Abidin Pagar Alam No. 26 Bandar Lampung. Phone 0721-701979

---

**SURAT TUGAS**

No. 07a/ST/FT-UBL/II/2021

Dekan Fakultas Teknik Universitas Bandar Lampung dengan ini memberi tugas kepada:

Nama : Ir. Zein Muhamad, MT.  
NIP : 19640912 119 112 1 001  
Fakultas : Teknik  
Program Studi : Teknik Mesin  
Jabatan : Dosen Fakultas Teknik Universitas Bandar Lampung

Untuk melaksanakan kegiatan di bidang penelitian **“Dampak Perubahan Tekanan Vakum Terhadap Efisiensi Termal Dan Penggunaan Bahan Bakar Pada Proses Kerja Kondensor”**.

Demikian Surat Tugas ini dibuat untuk dilaksanakan sebagaimana mestinya dan setelah dilaksanakan kegiatan tersebut agar melaporkan kepada Dekan

Bandar Lampung, 25 Februari 2021

Dekan,

**Ir. Jusjardi, MT.**

## LEMBAR PERNYATAAN PENGESAHAN HASIL VALIDASI KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini Pimpinan Perguruan Tinggi Universitas Bandar Lampung Menyatakan dengan sebenarnya bahwa **karya ilmiah** sebanyak satu judul yang diajukan sebagai bahan Laporan Beban Kerja Dosen atas nama :

Nama	: Ir. Zein Muhamad, MT
NIP	: 196409121991121001
NIDN	: 0012096409
Pangkat, golongan ruang, TMT	: Penata/ III/c
Jabatan, TMT	: 1 Oktober 1999
Bidang Ilmu/Mata Kuliah	: Teknik Mesin
Jurusan/Program Studi	: Teknik Mesin
Unit Kerja	: Universitas Bandar Lampung Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin


Telah diperiksa dan divalidasi dengan baik, dan kami turut bertanggung jawab bahwa **karya ilmiah** tersebut telah memenuhi syarat kaidah ilmiah, norma akademik, dan norma hukum, sesuai dengan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 17 Tahun 2010 tentang Pencegahan dan Pananggulangan Plagiat di Perguruan Tinggi.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 18 Agustus 2021

Validasi :

An. Rektor Universitas Bandar Lampung  
Wakil Rektor I Bidang Akademik,



**universitas  
bandar Lampung**

Dr. Ir. Hi. Hery Riyanto, M.T.

## HALAMAN PENGESAHAN


1. a. Judul Penelitian : **“Dampak Perubahan Tekanan Vakum Terhadap Efisiensi Termal dan Penggunaan Bahan Bakar Pada Proses Kerja Kondensor”.**
- b. Bidang Ilmu : Teknik Mesin
2. Pelaksana :
- a. Nama : Ir. Zein Muhamad, MT.
- b. Jenis Kelamin : Laki-laki
- c. NIP / NIDN : 0012096409
- d. Pangkat/Gol. : Penata / IIIc
- e. Jabatan Fungsional : Lektor
- f. Fakultas/Program Studi: Teknik/Teknik Mesin
- g. Perguruan Tinggi : Universitas Bandar Lampung
- h. Pusat Penelitian : LPPM Universitas Bandar Lampung
- i. Alamat : Jl. Zainal Abidin Pagar Alam No. 26 Bandar Lampung  
Telp. 0721-701979; Kode Pos. 35142
- j. Alamat Rumah : Jl. Hi. Said II – LK. II – RT/RW. 013/000 – Kota Baru –  
Tanjung Karang Timur – Bandar Lampung
- k. Telepon /HP : 085367098264
- l. Email : [muhamadzein29@yahoo.com](mailto:muhamadzein29@yahoo.com)
- m. Waktu Pelaksanaan : 6 bulan

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Teknik



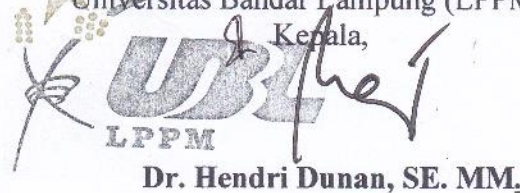
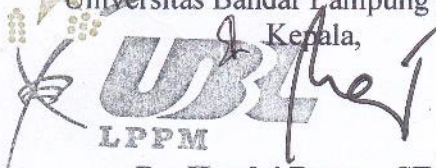
**Ir. Juniardi, MT.**

Bandar Lampung, 18 Agustus 2021  
Ketua Pelaksana



**Ir. Zein Muhamad, MT.**

Mengetahui,  
Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat  
Universitas Bandar Lampung (LPPM-UBL)



Kepala,  
**Dr. Hendri Dunan, SE. MM.**



**UNIVERSITAS BANDAR LAMPUNG**  
**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN PADA MASYARAKAT**  
**( LPPM )**

Jl. Z.A. Pagar Alam No : 26 Labuhan Ratu, Bandar Lampung Telp: 701979  
E-mail : lppm@ubl.ac.id

---

SURAT KETERANGAN

Nomor : 156 / S.Ket / LPPM-UBL / VIII / 2021

Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat ( LPPM ) Universitas Bandar Lampung dengan ini menerangkan bahwa :

- |                                 |                                              |
|---------------------------------|----------------------------------------------|
| 1. Nama                         | : Ir. Zein Muhamad.,M.T                      |
| 2. NIDN                         | : 0012096409                                 |
| 3. Tempat, tanggal lahir        | : Bajawa, 12 September 1964                  |
| 4. Pangkat, golongan ruang, TMT | : Penata/ III.c                              |
| 5. Jabatan TMT                  | : Lektor                                     |
| 6. Bidang Ilmu / Mata Kuliah    | : Teknik                                     |
| 7. Jurusan / Program Studi      | : Teknik Mesin                               |
| 8. Unit Kerja                   | : Fakultas Teknik Universitas Bandar Lampung |

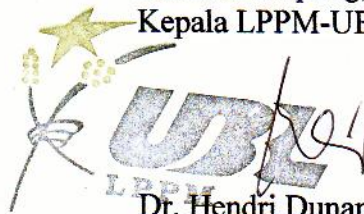
Telah Melaksanakan Penelitian dengan judul

**:"Dampak Perubahan Tekanan Vakum Terhadap Efisiensi Termal Pada Proses Kerja Kondensor".**

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 18 Agustus 2021

Kepala LPPM-UBL 



Dr. Hendri Dunan, SE.,M.M

Tembusan:

1. Rektor UBL ( sebagai laporan )
2. Yang bersangkutan
3. Arsip

# **PENELITIAN**

## **DAMPAK PERUBAHAN TEKANAN VAKUM TERHADAP EFISIENSI TERMAL DAN PEMAKAIAN BAHAN BAKAR PADA PROSES KERJA KONDENSOR**



**Oleh :**

**ZEIN MUHAMAD**

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BANDAR LAMPUNG  
2021**

## ABSTRAK

### DAMPAK PERUBAHAN TEKANAN VAKUM TERHADAP EFISIENSI TERMAL PADA PROSES KERJA KONDENSOR

Oleh,  
ZEIN MUHAMAD

Penggunaan tenaga listrik untuk mendukung kegiatan hidup dan proses industri terus mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Untuk itu berbagai upaya dilakukan guna mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan ketersediaan energi listrik tersebut; baik melalui regulasi yang dikeluarkan oleh pemerintah maupun dengan meningkatkan kualitas dan kapasitas pembangkitnya.

Kualitas dan kapasitas pembangkit listrik dipengaruhi oleh banyak faktor, di antaranya sumber energi utamanya (air, uap, gas, angin, matahari fosil atau nuklir), proses kerja system dan performance dari system pembangkit itu sendiri.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Sebalang Unit-2 dengan kapasitas 2x100 MW merupakan salah satu unit pembangkit tenaga listrik yang menggunakan bahan bakar batubara dengan jenis *Turbin double stages* dan termasuk dalam golongan transmisi 150 kV di Indonesia. Sebagai bagian dari system pembangkit tenaga, telah terjadi kenaikan tekanan vakum pada kondensor. Hal ini mengakibatkan efisiensi termal mengalami penurunan dan turunnya konsumsi/pemakaian bahan bakar. Penelitian ini menganalisa akibat kenaikan tekanan vakum dengan pendekatan analisa termodinamika. sehingga nantinya dapat diketahui pengaruh kenaikan tekanan vakum pada kondensor terhadap nilai parameter operasional. Data awal yang diperoleh, tekanan vakum operasional sekitar  $-83 \text{ kPa(g)}$  dari desain sebesar  $-93 \text{ kPa(g)}$  atau mengalami kenaikan tekanan vakum sebesar  $10 \text{ kPa(g)}$ .

Dari hasil perhitungan, kenaikan tekanan vakum mengakibatkan penurunan nilai parameter operasional yakni berupa kenaikan suhu, dan entalpi pada *outlet Low Pressure Turbine, inlet Kondensor, Condensate Pump* dan konsumsi bahan bakar. Setiap kenaikan tekanan vakum kondensor rata-rata sebesar satu (1)  $\text{Kpa(g)}$  berakibat turunnya efisiensi sebesar 0,2289 %, hal ini juga berdampak kepada hilangnya daya sebesar 0,715 MW pada *Low Pressure*, yang pada akhirnya akan menurunkan pemakaian bahan bakar batubara rata-rata sebesar  $8,14428 \text{ Ton/hari}$ .

**Kata Kunci** : tekanan vakum kondensor, efisiensi termal, konsumsi bahan bakar

# DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>ix</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Ruang Lingkup.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Waktu dan Tempat .....	3
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Pusat Pembangkit Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Karakteristik Unjuk Kerja .....	5
2.1.2 Pemilihan Jenis Pusat Pembangkit Tenaga Listrik .....	6
2.2. Macam dan Sifat Energi .....	6
2.2.1 Pernyataan Clausius .....	7
2.2.2 Pernyataan Kelvin - Planck .....	8
2.3. Siklus Uap dan Air PLTU.....	8
2.4. Kondensor .....	9
2.5. Komponen Utama Kondensor .....	12



2.6. Pompa Vakum ( <i>Vacum Pump</i> ) .....	13
2.7. Faktor Pengaruh Unjuk Kerja Kondensor .....	14
2.8. Kerja Turbin .....	15
2.9. Kerja Boiler Feed Pump .....	15
2.10. Efisiensi Termal .....	16
2.11. Jumlah Konsumsi Batu Bara .....	16

### **BAB III PERHITUNGAN DAN ANALISA**

3.1. Pendahuluan.....	17
3.2. Data dan Spesifikasi Peralatan .....	17
3.3. Menentukan Parameter Tingkat Keadaan .....	18
3.3.1 Tingkat Keadaan No.1 .....	19
3.3.2 Tingkat Keadaan No.2 .....	20
3.3.3 Tingkat Keadaan No.3 .....	20
3.3.4 Tingkat Keadaan No.4 .....	20
3.3.5 Tingkat Keadaan No.5 .....	20
3.3.6 Tingkat Keadaan No.6 .....	21
3.3.7 Tingkat Keadaan No.7 .....	21
3.3.8 Tingkat Keadaan No.8 .....	21
3.3.9 Tingkat Keadaan No.9 .....	21
3.3.10 Tingkat Keadaan No.10 .....	21
3.3.11 Tingkat Keadaan No.11 .....	22
3.3.12 Tingkat Keadaan No.12 .....	22
3.3.13 Tingkat Keadaan No.13 .....	22
3.3.14 Tingkat Keadaan No.14 .....	22
3.3.15 Tingkat Keadaan No.15 .....	22
3.3.16 Tingkat Keadaan No.16 .....	22

3.3.17 Tingkat Keadaan No.17 .....	23
3.3.18 Tingkat Keadaan No.18 .....	23
3.3.19 Tingkat Keadaan No.19 .....	23
3.3.20 Tingkat Keadaan No.20 .....	23
3.3.21 Tingkat Keadaan No.21 .....	23
3.3.22 Tingkat Keadaan No.22 .....	23
3.3.23 Tingkat Keadaan No.23 .....	23
3.4. Menghitung Nilai Fraksi dan Massa.....	24
3.4.1 Fraksi $y_2$ dan Massa $m_2$ .....	24
3.4.2 Fraksi $y_3$ dan Massa $m_3$ .....	24
3.4.3 Fraksi $y_4$ dan Massa $m_4$ .....	24
3.4.4 Fraksi $y_5$ dan Massa $m_5$ .....	24
3.4.5 Fraksi $y_6$ dan Massa $m_6$ .....	25
3.4.6 Fraksi $y_7$ dan Massa $m_7$ .....	25
3.4.7 Fraksi $y_{23}$ dan Massa $m_{23}$ .....	25
3.4.8 Fraksi $y_8$ dan Massa $m_8$ .....	26
3.5. Menghitung Kerja Turbin.....	27
3.5.1 Menghitung Kerja High Pressure Turbine ( $WT_{HP}$ ).....	27
3.5.2 Menghitung Kerja Low Pressure Turbine ( $WT_{LP}$ ).....	27
3.6. Menghitung Kerja Pompa.....	27
3.6.1 Menghitung Kerja Pompa Condensat (WCP).....	27
3.6.2 Menghitung Kerja Pompa Feed Boiler (WBF).....	28
3.7. Perhitungan Panas Masuk dan Panas Keluar.....	28
3.7.1 Perhitngan Panas Masuk ( $Q_{in}$ ).....	28
3.7.2 Perhitungan Panas Keluar ( $Q_{out}$ ).....	28
3.8. Perhitungan Efisiensi Termal.....	29

3.9. Perhitungan Konsumsi Batu Bara.....	29
3.10. Analisa Hasil Perhitungan.....	29
3.10.1 Pengaruh Tekanan Vakum Pada Kondensor.....	29
3.10.2 Pengaruh Terhadap Entalpi Outlet LP Turbin.....	30
3.10.3 Pengaruh Terhadap Entalpi Outlet Kondensor.....	30
3.10.4 Pengaruh Terhadap Panas Keluar ( $Q_{out}$ ).....	31
3.10.5 Pengaruh Terhadap Temperatur Outlet Kondensor .....	32
3.10.6 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Kerja Condensat Pump..	32
3.10.7 Pengaruh Terhadap Temperatur Outlet Condensat Pump.....	33
3.10.8 Pengaruh Terhadap Kerja Condensat Pump .....	33
3.11. Analisa Perubahan Vacum Terhadap Siklus PLTU .....	34
3.11.1 Pengaruh Terhadap Kerja LP Turbin.....	34
3.11.2 Pengaruh Terhadap Efisiensi Termal.....	35
3.11.3 Pengaruh Terhadap Pemakaian Batu Bara.....	36

#### **BAB IV PENUTUP**

5.1 Kesimpulan.....	37
5.2 Saran .....	37

#### **DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Gambar Lengkungan Masukan – Keluaran .....	6
2.2 Gambar Lengkungan Efisiensi .....	6
2.3 Gambar Pemakaian Bahan Bakar Spesifik .....	6
2.4 Gambar Pemakaian Bahan Bakar Inkremental .....	7
2.5 Klasifikasi Sumber Energi Didasarkan Pada Asal Energi .....	7
2.6 Klasifikasi Sumber Energi Didasarkan Pada Sifat Energi .....	7
2.7 Hukum kedua termodinamika berdasarkan pernyataan Clausius.....	7
2.8 Hukum Kedua Termodinamika Menurut Kelvin-Planck .....	7
2.9 Siklus Fluida Kerja PLTU Sederhana .....	7
2.10 Kondensor .....	7
2.11 Komponen Daripada Sebuah Kondensor .....	7
2.12 Vakum Pump Pada Kondensor .....	7
2.13 Pompa Vakum .....	7
2.14 Hubungan Antara Tekanan Absolut, Gauge, Dan Vakum .....	7
2.15 Pengaruh Variasi Tekanan Pada Kondensor .....	7
2.16 Kebocoran Pada Kondensor .....	7
3.1 Instalasi PLTU Sebalang.....	19
3.2 Diagram T-s PLTU Sebalang.....	19
3.3 Grafik Pengaruh Tekanan Vakum pada Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Low Pressure Turbin .....	30
3.4 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Kondensor. ....	30

3.5 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap $Q_{out}$ pada Kondensor.....	31
3.6 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Temperatur Outlet Kondensor .....	32
3.7 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Condensat Pump .....	33
3.8 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kondensor Pump .....	33
3.9 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap LP Turbin .....	34
3.10 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Efisiensi Termal .....	35
3.11 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Konsumsi Batubara .....	36

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Spesifikasi Kondensor PLTU Sebalang .....	10
Tabel 3.1 Data Operasi PLTU Sebalang.....	17
Tabel 3.2 Interpolasi Tingkat Keadaan 1.....	19
Tabel 3.3 Parameter Tiap Tingkat Keadaan .....	26
Tabel 3.4 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Condensor .....	29
Tabel 3.5 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Kerja Condensat Pump .....	32
Tabel 3.6 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap siklus PLTU .....	34

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran</b>	<b>Halaman</b>
Lampiran 1. Steam Turbine dan Line Diagram .....	39
Lampiran 2. Circulation Water System dan Turbine Gland Sealing Steam .....	40
Lampiran 3. Feed Water Pump System dan Deaerator System .....	41
Lampiran 4. Condensate Water System dan Turbine Extraction System .....	42
Lampiran 5. Boiler Drum dan Desuperheater .....	43
Lampiran 6. Fluidized Air Blower dan Coal Feeder .....	44

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Merupakan suatu aksioma bahwa suatu unit ekonomi dalam suatu masyarakat modern memerlukan pertumbuhan untuk dapat bersaing dan berlangsung. Perlu tumbuh dalam perputaran barang dan jasa; ukuran dan volume serta tumbuh dalam pemanfaatan energi. Selain tumbuh, perlu pula ditingkatkan taraf penguasaan dan kemahiran penggunaan teknologi.

Biasanya suatu kenaikan produktifitas dari suatu unit ekonomi, akan berdampak pada peningkatan keperluan terhadap energi. Penambahan energi ini perlu untuk dipertimbangan seperti penambahan terhadap kapasitas dari pusat-pusat tenaga listrik juga proses penanganan dan perawatannya.

Fungsi sebuah system penyediaan tenaga listrik adalah membangkitkan, menyalurkan dan menyediakan energi listrik dengan kualitas yang diinginkan di tempat dan waktu yang tepat. Beberapa tolok ukur yang dipergunakan untuk menilai taraf keandalan system pembangkit listrik antara lain:

1. Kemungkinan kehilangan beban (KKB) atau *Loss Of Load Probability* (LOLP)
2. Kemungkinan kehilangan energi (KKE) atau *Loss Of Energy Probability* (LEP)
3. Kehilangan beban yang diperkirakan (KBD) atau *Expected Loss Of Load* (ELL)
4. Frakwensi jumlah gangguan yang terjadi serta lamanya gangguan yang diperkirakan (*Expected Frequency and expected Duration Of Outages*)
5. Penyimpangan frekuensi dan tegangan terhadap nilai nominal.



Siklus fluida kerja di PLTU Sebalang merupakan siklus tertutup, yaitu menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Didalam boiler air dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap kering (*superheat steam*). Uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tinggi tertentu dialirkan ke turbin sehingga terjadi perubahan energi panas dari uap menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Putaran turbin digunakan untuk memutar generator sehingga dihasilkan energi listrik. Uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin dengan media air laut agar berubah menjadi air kondensasi. Air kondensasi ini kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler dengan terlebih dahulu dilakukan pemanasan awal secara bertahap dengan menggunakan *heater-heater* yang mendapatkan panas dari ekstraksi turbin.

Tekanan vakum pada kondensor berfungsi untuk membuat tekanan pada kondensor rendah, dengan tekanan yang rendah maka uap akan bisa bergerak dengan mudah menuju kondensor, sehingga menghasilkan peningkatan yang signifikan pada kerja netto dan efisiensi termal. Tekanan vakum kondensor hanya menunjukkan nilai saja bahwa proses kondensasi di kondensor berjalan dengan normal. Bila tekanan kondensor buruk atau naik, banyaknya kalor uap yang dapat diekstrak oleh turbin tidak maksimal karena tekanan vakum berhubungan dengan titik saturasi uap dan akan terjadi *back pressure* terhadap turbin yang efeknya selain menurunkan efisiensi karena seakan-akan turbin tersebut mengalami pengereman, karena ada tekanan positif, selain itu juga akan terjadi vibrasi yang lebih tinggi.

Untuk menghasilkan daya listrik pada generator yang sama, maka dibutuhkan aliran (*flow*) uap yang lebih besar. Flow uap lebih besar akan berhubungan dengan banyaknya batubara yang dibakar, dan banyak air yang dipanaskan di boiler.

PLTU Sebalang mengalami kenaikan tekanan vakum pada kondensor hingga mencapai  $-83 \text{ kPa(g)}$  sedangkan tekanan desain dan pada saat proses comissioning tekanan vakum sebesar  $-93 \text{ kPa(g)}$ , pada beban  $100 \text{ MW}$ . Keandalan sebuah pembangkit listrik tenaga uap sangat bergantung pada kinerja peralatannya. Akibat dari faktor penurunan performa pada peralatan pembangkit dapat menyebabkan efisiensi menurun, energi panas yang diperlukan untuk pembangkitan listrik bertambah, dan juga pemborosan bahan bakar, sehingga diharapkan dengan diketahui pengaruh penurunan vakum maka dapat diperoleh kerja efisiensi termal yang optimal.

## **1.2 Ruang Lingkup**

Penelitian dilakukan terhadap komponen peralatan kondensor di unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang dengan kapasitas  $100 \text{ MW}$ . Dengan menganalisa faktor-faktor yang berpengaruh akibat terjadinya kenaikan tekan vakum, terutama terhadap efisiensi dan pemakaian bahan bakar batu baranya.

## **1.3 Tujuan**

Penelitian bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh yang ditimbulkan akibat terjadinya penurunan tekanan vakum pada unit kondensor terhadap efisiensi panas dan kebutuhan penggunaan bahan bakar batu bara.

## **1.4 Waktu dan Tempat**

Kegiatan penelitian dilakukan mulai dari bulan Maret sampai dengan bulan Mei 2021, di Perusahaan Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang dan Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Bandar Lampung.

## BAB II

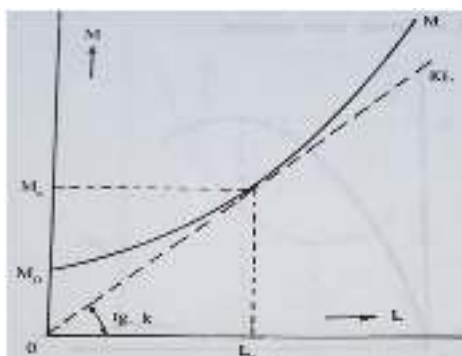
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

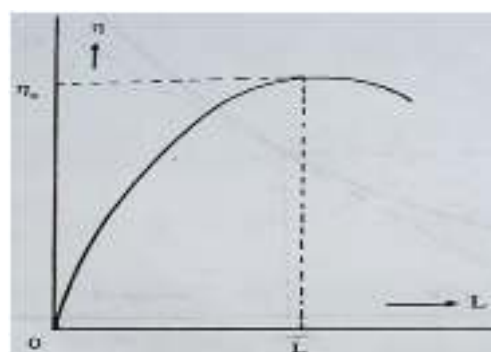
##### 2.1.1 Karakteristik Unjuk Kerja

Performansi atau unjuk kerja sebuah pusat pembangkit tenaga listrik pada prinsipnya ditentukan oleh apa yang dinamakan lengkung masukan-keluaran. Lengkungan ini memberikan gambaran seberapa besar efisiensi termis yang dapat dicapai oleh pusat pembangkit listrik tersebut.

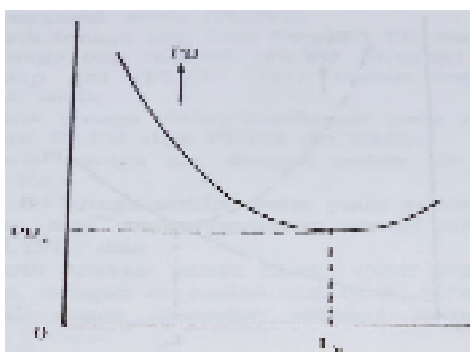
Selain tergantung dari sifat-sifat pusat pembangkit tenaga listrik tersebut seperti efisiensi konversi dan keandalan, lengkung masukan-keluaran; juga bergantung kepada kondisi di luar pusat pembangkit itu sendiri, seperti keadaan air pendingin, kualitas bahan bakar, kecakapan para operator dan bentuk lengkung beban.



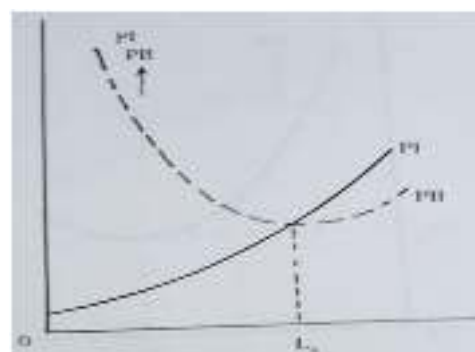
**Gambar 2.1:** Lengkungan Masukan – Keluaran



**Gambar 2.2:** Lengkung Efisiensi



**Gambar :** Pemakaian Bahan Bakar Spesifik



**Gambar :** Pemakaian Bahan Bakar Inkremental

### 2.1.2 Pemilihan Jenis Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

Jenis pusat pembangkit tenaga listrik konvensional pada umumnya adalah:

- 1). Pusat listrik tenaga diesel; yang mempergunakan motor diesel sebagai penggerak mula (PLTD)
- 2). Pusat listrik tenaga gas; yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak mula (PLTG)
- 3). Pusat listrik tenaga uap batu bara (PLTU Batu Bara) dan pusat listrik tenaga uap minyak (PLTU Minyak) serta pusat listrik tenaga uap gas (PLTU Gas) disini turbin uap dipakai sebagai penggerak mulanya.
- 4). Pusat listrik tenaga siklus kombinasi (kombinasi PLTU & PLTG=PLTSK)
- 5). Pusat listrik tenaga air dengan turbin air sebagai penggerakannya (PLTA)
- 6). Pusat listrik tenaga nuklir; digerakan oleh turbin gas dengan bahan bakarnya adalah energi nuklir (PLTN)
- 7). Pusat listrik tenaga panas bumi; penggerak mulanya adalah turbin uap.

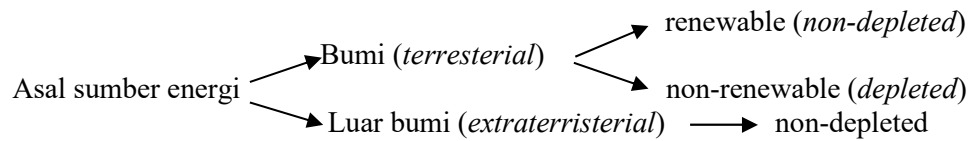
## 2.2 Macam dan Sifat Energi

Energi adalah sesuatu yang bersifat abstrak karena sukar untuk dibuktikan keberadaannya, namun dapat dirasakan adanya; juga dikatakan energi merupakan kemampuan melakukan usaha atau kerja. Dan energi sifatnya adalah kekal, dalam artian tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan namun dapat diubah bentuknya atau dikonversikan.

Secara umum energi dapat dikategorikan menjadi beberapa macam; yaitu:

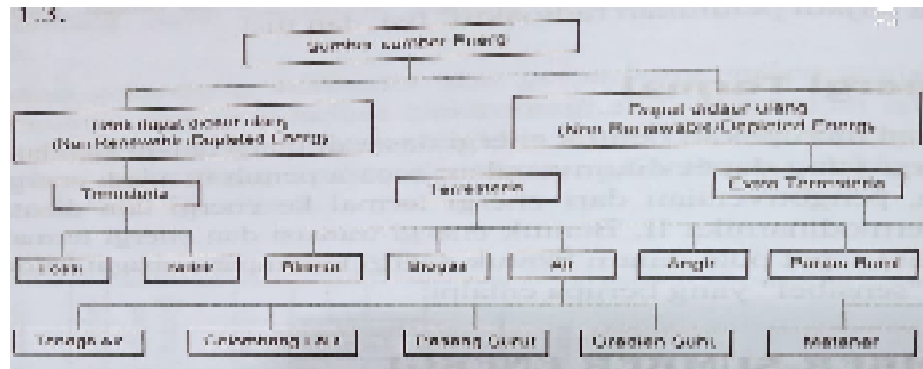
1. Energi mekanik; bentuk transisinya adalah energi kinetik dan energi potensial
2. Energi listrik; merupakan bentuk energi yang timbul sebagai akumulasi arus elektron. Energi listrik ekuivalen dengan energi elektromagnetis
3. Energi elektromagnetik; Energi yang berkaitan dengan radiasi elektromagnetik, dan merupakan bentuk energi transmisi yang bergerak dengan kecepatan cahaya.
4. Energi kimia; energi yang berkaitan dengan hasil interaksi elektron dalam upaya menghasilkan suatu senyawa kimia yang stabil.
5. Energi nuklir; biasanya berbentuk energi yang tersimpan, akan dilepaskan jika ada interaksi partikel dengan atau di dalam inti atom.
6. Energi termal; merupakan bentuk energi dasar, maksudnya bahwa semua energi dapat dikonversikan secara penuh menjadi energi panas.

Asal dan sifat sumber energi dapat diskemakan seperti pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.5:** Klasifikasi sumber energi didasarkan pada asal energi

Sedangkan secara diagram dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.

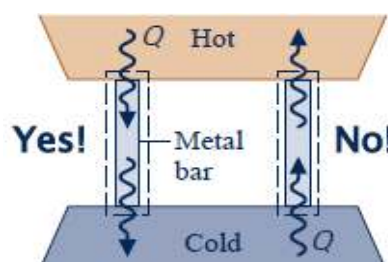


**Gambar 2.6:** Klasifikasi sumber energi didasarkan pada sifat energi

Hukum dasar dalam system konversi energi didasarkan kepada hukum termodinamika pertama dan hukum termodinamika kedua. Dalam hukum termodinamika pertama mengungkapkan bahwa energi bersifat kekal, namun dapat di konversikan kedalam bentuk energi yang lain. Sedangkan hukum termodinamika kedua menunjukkan ke arah mana suatu proses itu berlangsung (*reversible* ataukah *irreversible*)

### 2.2.1 Pernyataan Clausius

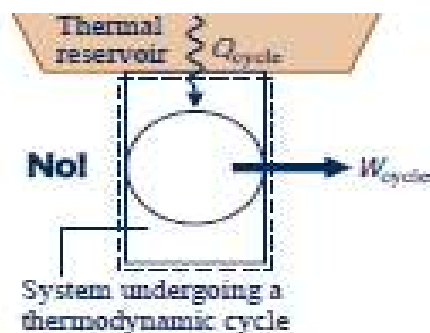
Clausius mengatakan bahwa tidak mungkin bagi suatu sistem yang beroperasi sedemikian rupa sehingga hasil tunggalnya akan berupa suatu perpindahan energi dalam bentuk kalor dari benda yg lebih dingin ke benda yg lebih panas.



**Gambar 2.7:** Hukum kedua termodinamika berdasarkan pernyataan Clausius

### 2.2.2 Pernyataan Kelvin-Planck

Mengatakan tidak ada sebuah mesin kalor yang dapat mengubah semua panas yang diterima menjadi kerja.. Jadi besarnya kerja yang diperoleh akan lebih kecil dari panas yang diberikan. Penjelasan dari pernyataan Kelvin-Planck yaitu tidak ada sebuah alat / mesin kalor yang bekerja dalam suatu siklus menerima panas dari reservoir bertemperatur tinggi dan mengubah seluruh panas tersebut menjadi kerja bersih. Atau dengan kata lain tidak ada mesin kalor yang mempunyai efisiensi 100%.



**Gambar 2.8:** Hukum Kedua Termodinamika Menurut Kelvin-Planck

### 2.3 Siklus Uap Dan Air PLTU

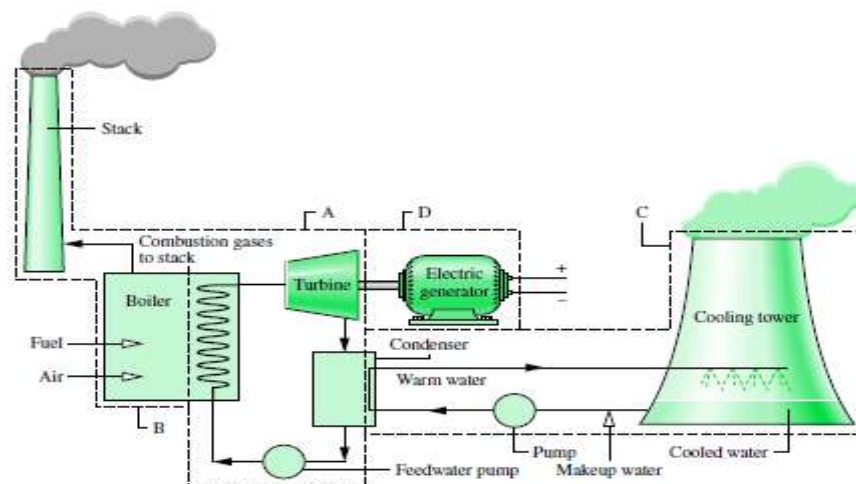
PLTU menggunakan fluida kerja air - uap yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Pertama air diisikan ke boiler hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan pemindah panas. Di dalam boiler air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar Batubara dengan udara sehingga berubah menjadi uap. Kedua, uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.

Generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan. Ketiga, uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin sehingga berubah kembali menjadi air. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler.

Sekalipun siklus fluida kerjanya merupakan siklus tertutup, namun jumlah air dalam siklus akan mengalami pengurangan. Pengurangan air ini disebabkan oleh kebocoran baik yang disengaja maupun yang tidak disengaja.

Untuk mengganti air yang hilang, maka diperlukan air hasil produksi *water treatment plant* (WTP) sebagai penambah (*make up*) di *hotwell* kondensor

Air pendingin (*cooling water*) dipasok oleh sistem air pendingin utama (*circulating water*), dan sistem air pendingin bantu. Sistem air pendingin utama mengambil air dari kanal masuk untuk air pendingin kondensor dan *heat exchanger* sistem pendingin bantu. Sistem air pendingin bantu melayani alat bantu boiler dan turbin. Sistem ini disediakan untuk pusat pembangkit yang terdiri dari beberapa unit yang saling terhubung (*interkoneksi*) antar unit.



**Gambar 2.9:** Siklus fluida kerja PLTU sederhana

## 2.4 Kondensator

Kondensator adalah suatu alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang digunakan untuk merubah uap bekas turbin menjadi air. Proses perubahan uap menjadi air di kondensor menimbulkan pelepasan panas dari uap ke air pendingin. Jumlah panas yang berpindah atau diserap air pendingin sangatlah besar mengingat jumlah uap bekas turbin juga besar. Panas ini kemudian dibuang ke laut atau ke udara tanpa dapat dimanfaatkan. Hal ini merupakan kerugian yang terbesar didalam siklus panas PLTU, sebagai pendingin digunakan air sungai atau air laut.

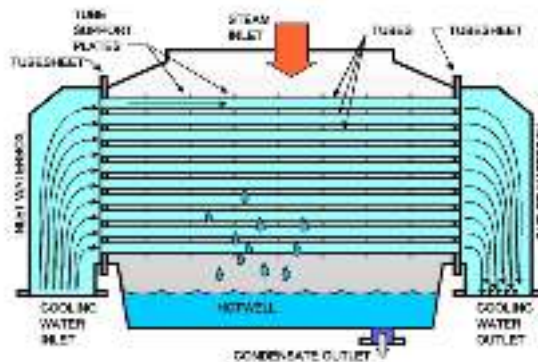
Selain fungsi utamanya untuk mengkondensasikan uap menjadi air, kondensator juga mempunyai fungsi yang lain :

1. Sebagai penampung dan pengontrol air kondensat
2. Sebagai pembuang udara atau gas yang tidak terkondensasi
3. Sebagai penambah energi ke turbin

Dalam kondensor terjadi perpindahan kalor dari uap ke air pendingin yang mengalir dalam aliran terpisah. Uap kondensasi dan temperatur air pendingin meningkat. Pada kondisi tunak, kesetimbangan laju massa dan energi untuk volume atur yang melingkupi bagian kondensasi dari penukar kalor dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{Q_{out}}{m} = h_2 - h_3.$$

Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperature tetap. Terjadinya vacuum pada ruang kondensor karena uap dikondensasi pada temperatur kurang dari 100 °C di dalam ruang tertutup. Kondensor merupakan titik efisiensi dari PLTU. Hampir 50 % panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar diserahkan ke air pendingin didalam kondensor untuk selanjutnya dibuang ke laut. Perubahan vacuum sedikit saja pada kondensor akan cukup mempengaruhi efisiensi PLTU. Maka sangatlah penting untuk mengusahakan kondensor selalu dalam kinerja yang baik.



**Gambar 2.10:** Kondensor

Hal-hal yang mempengaruhi kinerja kondensor adalah :

1. Laju perpindahan panas tergantung pada laju aliran air pendingin.
2. Kebersihan bagian dalam pipa-pipa.
3. Temperatur air pendingin masuk.
4. Adanya gas-gas non condensable yang menyelimuti pipa-pipa.
5. Luas permukaan perpindahan panas.
6. Adanya pipa yang disumbat karena bocor akan mengurangi luas permukaan perpindahan panas.



Digunakannya air laut sebagai air pendingin membawa berbagai resiko yang dapat terjadi, seperti masuknya sampah – sampah dan hewan – hewan laut ke dalam kondensor yang dapat menghambat laju perpindahan panas. Telah dicoba untuk menekan resiko tersebut dengan menggunakan beberapa alat penyaring yang di pasang pada *line cooling water* sistem. Seperti *Floating Screen*, *Bar Screen*, *Travel Band Screen*, dan *Debrish Filter*. Tetapi alat-alat tersebut tidak dapat 100% menghilangkan resiko tersebut. Terkadang sampah – sampah kecil dan juga biota – biota laut yang berukuran kecil seperti plankton dapat lolos dari peralatan tersebut dan menempel di kondensor dan untuk mengatasi hal tersebut digunakan *Taproge Ball System* atau yang biasa disebut *Ball Cleaning System* untuk membersihkannya. Sistem ini membersihkan bagian dalam tube melalui bola – bola karet yang masuk ke bagian dalam tube dan menyikat kerak – kerak yang menempel pada bagian dalam tube yang dapat mengganggu proses perpindahan panas. Bola – bola karet tersebut elastis, dan memiliki permukaan yang sedikit kasar dan berukuran sedikit lebih besar dari pada diameter tube.

**Table 2.1** Spesifikasi Kondensor PLTU Sebalang

NO	URAIAN	DATA
1	Manufacture	Chang Jiang Energy Corp.
2	Type	<i>N-7600-1</i>
3	Cooling area	<i>7600 m<sup>2</sup></i>
4	Pressure in the condensor	<i>8 kpa (a)</i>
5	Inlet steam flow	<i>296.74 T/h</i>
6	Temperatre of cooling water	<i>30 °C</i>
7	Coagulation temperature	<i>41.54 °C</i>
8	Cooling water flow	<i>19524 t/h</i>
9	Coaling water quality	<i>Air laut</i>
10	Water speed in cooling tubes	<i>2.3 m/s</i>
11	Cooling tube number	<i>1017</i>

## 2.5 Komponen Utama Kondensor



**Gambar 2.11:** Komponen daripada sebuah kondensor

Beberapa komponen – komponen utama yang terdapat pada kondensor yaitu:

### 1. Selongsong (*Shell*)

Pipanya di roll pada pemegang pipa pada ujung-ujungnya. Untuk memungkinkan pemuaiannya antara pipa air masuk dan selongsong, maka fleksibel diafragma dipasang pada sisi masuk dan keluar dari selongsong.

Diafragma ini berfungsi sebagai *flange* yang menghubungkan selongsong, plat pemegang pipa dan *water box*. *Expansion joint* yang terletak pada leher kondensor untuk memungkinkan diferensial *expansion*.

### 2. Ruang Air (*Water Box*)

Ruang-ruang air pada sisi masuk dan keluar terbuat dari baja karbon dan masing-masing mempunyai lobang lalu orang.

### 3. Pipa dan Pemegang Pipa (*Tube Plats and Tubes*)

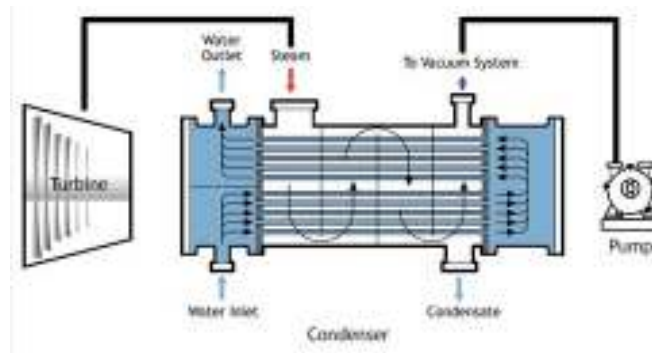
Pemegang pipa terbuat dari *naval brass* dan pipanya dari aluminium *brass*. Pipanya di roll ke pemegang pipa dan ditunjang dengan 6 buah penunjang pipa. Diafragma baja yang fleksibel memungkinkan diferensial *expansion* (pemuaiannya antara pipa aluminium *brass* dengan selongsong baja carbon). Kegunaan diafragma selongsong baja yang fleksibel selain untuk menghilangkan pemuaiannya juga digunakan sebagai penunjang (*support*) pemegang pipa dan ruang air.

### 4. Ruang kondensat (*hotwell*)

Ruang kondensat dilaskan pada sisi selongsong yang menampung semua kondensat dan dilengkapi dengan gelas penduga dan lubang lalu orang.

## 2.6 Vakum Pump

Sebelum turbin dioperasikan kondisi kondensor harus dibuat vakum agar ketika uap dialirkan ke turbin dapat melakukan kerja secara optimal dan terkondensasi di kondensor. Untuk membuat vakum kondensor disediakan *vakum pump*. Uap keluar dari pompa vakum dibuang langsung ke atmosfer (tidak dikondensasikan).



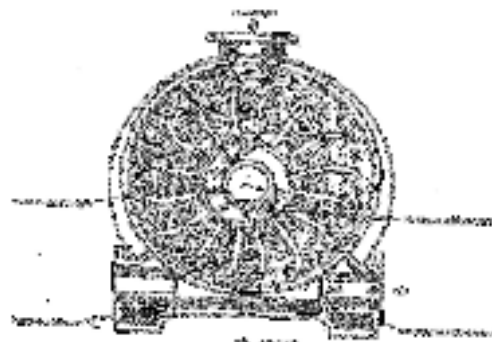
**Gambar 2.12:** Vakum pump pada kondensor

Vakum pump mempunyai kemampuan yang besar dalam menghisap udara/gas sehingga dapat membuat vakum kondensor dalam waktu yang relatif singkat.

Nilai vakum kondensor ini akan mempengaruhi bagaimana kinerja *steam turbine*.

Hal-hal yang mempengaruhi sistem PLTU oleh vakum kondensor yakni:

1. Meningkatkan beban turbin uap. Vakum kondensor akan mempengaruhi tinggi rendah beban yang dihasilkan oleh turbin uap. Apabila vakum tinggi dengan jumlah energi masuk turbin yang sama akan di dapat beban yang lebih tinggi.
2. Kedua, meningkatkan efisiensi pembangkitan. Efisiensi yang dihasilkan akan berhubungan dengan energi yang dibangkitkan. Semakin tinggi energi yang dibangkitkan efisiensi juga akan naik.



**Gambar 2.13:** Pompa vakum

Untuk menghitung besarnya tekanan vakum digunakan persamaan:

$$P(\text{vakum}) = P_{\text{atm}}(\text{absolut}) - P(\text{absolut})$$

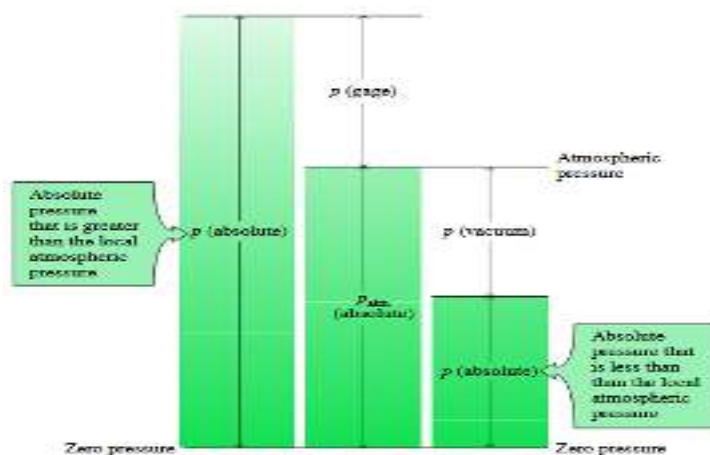
$P(\text{absolut})$  = tekanan *absolute* kondensor

$P_{\text{atm}}$  = tekanan atmosfer ( $101,325 \text{ pascal}$ )<sup>5</sup>

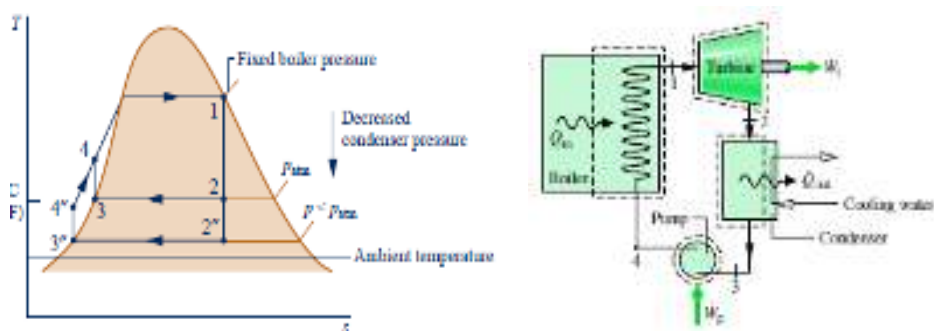
$P(\text{vakum})$  = tekanan vakum kondensor (g)

Jika tekanan atmosfer setempat lebih tinggi dari tekanan sistem namun jika tekanan sistem lebih tinggi dari tekanan atmosfer setempat, makadigunakan persamaan:

$$P(\text{gauge}) = p(\text{absolut}) - P_{\text{atm}}(\text{absolut})$$



**Gambar 2.14:** Hubungan antara tekanan absolut, gauge, dan vakum.



**Gambar 2.15:** Pengaruh Variasi Tekanan Pada Kondensor

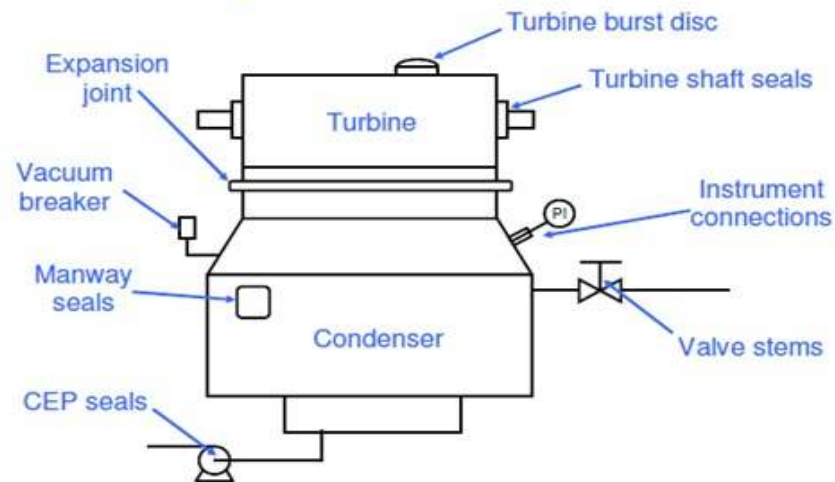
## 2.7. Faktor Pengaruh Unjuk Kerja Kondensor

Faktor unjuk kerja pada kondensor secara umum dimonitoring melalui perubahan pada tekanan vakum (negatif), dimana perubahan tekanan pada kondensor akan mempengaruhi efisiensi dan kemampuan turbin. Apabila tekanan vakum pada kondensor lebih rendah maka unjuk kerja dan efisiensi turbin akan meningkat, begitu juga sebaliknya apabila tekanan vakum tinggi (mendekati positif) maka proses terjadinya kondensasi akan berjalan lambat dan sebagian uap exhaust dari LP Turbine yang dalam keadaan saturated tidak seluruhnya dilepaskan ke kondensor sehingga akan mengakibatkan korosi pada stage terakhir di LP turbine.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi unjuk kerja kondensor:

1. **Kebersihan permukaan tube sisi air pendingin** : Kotoran-kotoran yang terbawa oleh air pendingin dari laut, sungai atau cooling tower akan menempel dipermukaan dalam tube, water box, pipa dan sebagainya. Kotoran ini akan menghambat transfer panas dari uap ke air pendingin dan akhirnya tekanan kondensasi menjadi tinggi, disamping itu kotoran ini juga dapat menghambat atau memperkecil aliran air pendingin.
2. **Kebersihan permukaan tube sisi uap** : Pada umumnya permukaan tube sisi uap akan tetap bersih karena disebabkan oleh temperatur dan tekanan dari LP Turbine exhaust, akan tetapi pada saat dioperasikan terdapat kemungkinan permukaan tube kondensor dilapisi oleh gas-gas yang tidak mengembun (*noncondensable gas*) sehingga menghambat transfer panas dari uap ke air pendingin.
3. **Aliran air pendingin** : Aliran air pendingin yang tidak sesuai atau kurang dari standart design akan mengurangi kemampuan pendinginan sehingga temperatur dan tekanan kondensasi akan menjadi naik.
4. **Temperatur air pendingin** : Temperatur air pendingin yang berasal dari laut dan sungai sangat dipengaruhi oleh cuaca/musim, berbeda dengan air pendingin yang diambil dari cooling tower derajat temperaturnya dipengaruhi oleh *performance cooling tower* serta temperatur udara luar.
5. **Kebocoran**: Gas-gas tersebut akan menyebabkan kenaikan tekanan kondensor, ini akan menyebabkan penurunan daya mampu yang dihasilkan oleh turbin uap dan menurunkan efisiensi pengoperasian turbin uap. Adapun beberapa tempat yang dapat menjadi sumber gas leakage sebagian seperti pada gambar di bawah.

## Air Leakage Points



Gambar 2.16: Kebocoran Pada Kondensor

### 2.8 Kerja Turbin

Kerja yang dihasilkan oleh suatu proses siklus adalah sama dengan jumlah perpindahan panas (kalor) pada fluida kerja selama proses siklus tersebut berlangsung. Untuk itu berikut langkah – langkah untuk menghitung kerja turbin.

$$W_{turbin} = Q_{in} - Q_{out}$$

Keterangan:

$W_{turbin}$  = kerja turbin ( $kJ/h$ )

$Q_{in}$  = total kalor uap yang masuk turbin, ( $kJ/h$ )

$Q_{out}$  = total kalor uap yang keluar turbin, ( $kJ/h$ )

### 2.9 Kerja Boiler Feed Pump

Kondensat air yang meninggalkan kondensor di kondisi 3 dipompa dari kondensor kedalam boiler yang bertekanan lebih tinggi. Dengan menggunakan volume atur disekitar pompa dan mengamsusikan tidak ada perpindahan kalor dengan sekitar, kesetimbangan laju massa dan energi adalah:

$$W_{pompa} = h_4 - h_3$$

Dimana:

$W_{pompa}$  = kerja total pompa (kW)

$h_3$  = entalpi inlet boiler feed pump (kJ/kg)

$h_4$  = entalpi outlet boiler feed pump (kJ/kg)

## 2.10 Efisiensi Termal

Efisiensi termal ( $\eta$ ) mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja melalui boiler yang di konversikan menjadi keluaran kerja netto.

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{(h_1 - h_2) - h_4 - h_3}{h_1 - h_4}$$

## 2.11 Jumlah Konsumsi Batubara

Jumlah pemakaian batubara dalam sehari dapat dilihat berdasarkan besaran efisiensi termal:

$$\text{pemakaian batubara} = \frac{\text{beban} \times 24 \text{ jam} \times 1000}{\text{efisiensi}} \times 860 \text{ kcal} \times \frac{1}{\text{kalori batubara}}$$

## BAB III

### PERHITUNGAN DAN ANALISIS

#### 3.1. Pendahuluan

Kegiatan penelitian dilakukan mulai dari bulan Maret sampai dengan bulan Mei 2021, di Perusahaan Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang dan Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Bandar Lampung. Penelitian dilakukan terhadap komponen peralatan kondensor di unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang dengan kapasitas 100 MW. Dengan menganalisa faktor-faktor yang berpengaruh akibat terjadinya kenaikan tekanan vakum, terutama terhadap efisiensi

dan pemakaian bahan bakar batu baranya.

#### 3.2. Data dan Spesifikasi Peralatan

**Tabel 3.1** Data Operasi PLTU Sebalang

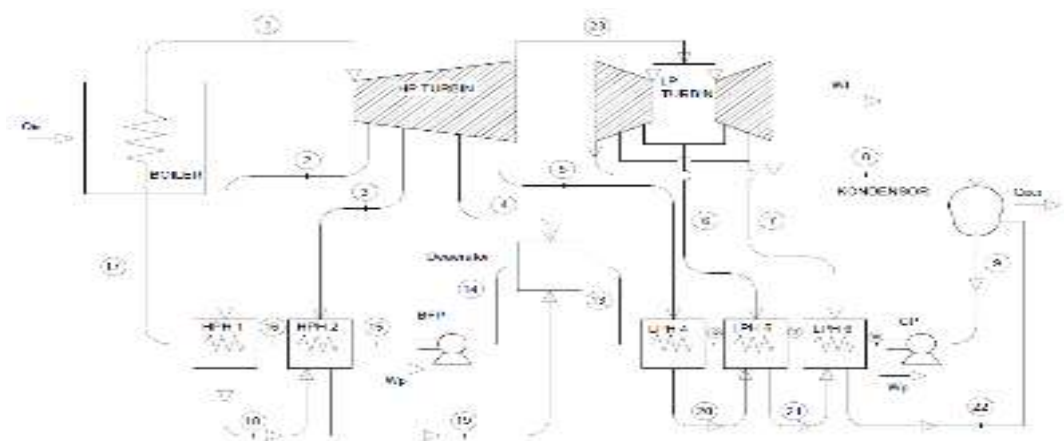
<i>NO</i>	<i>PARAMETER</i>	<i>SIMBOL</i>	<i>SATUAN</i>	<i>NILAI (abs)</i>
1	Main steam flow	<i>m</i>	<i>t/h</i>	402
2	Main steam temp	<i>t</i>	°C	535
3	Main steam press	<i>p</i>	<i>bar</i>	95,15325
4	Feed water flow final	<i>m</i>	<i>t/h</i>	450
5	Feed water temp final	<i>t</i>	°C	226
6	Feed water press final	<i>p</i>	<i>bar</i>	109,81325
7	Press in the Condensor	<i>p</i>	<i>bar</i>	0.17488
8	Deaerator press	<i>p</i>	<i>bar</i>	3,32325
9	Deaerator temp	<i>t</i>	°C	125.3
10	Condensate pump inlet temp	<i>t</i>	°C	54,45
11	Condensate pump out press	<i>p</i>	<i>bar</i>	13,43325
12	Condensate pump out flow	<i>m</i>	<i>t/h</i>	304,1
13	Main Boiler Feed water press	<i>p</i>	<i>bar</i>	125,71325
14	Main Boiler Feed water temp	<i>t</i>	°C	126,6
15	Outlet LP Heater temp	<i>t</i>	°C	98,5



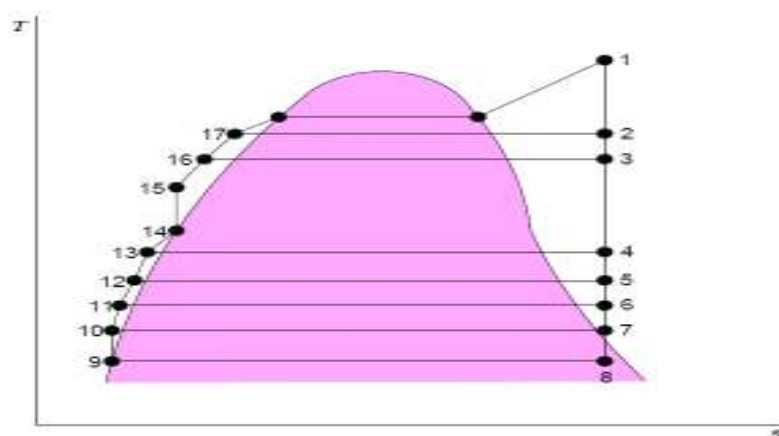
16	Outlet LP Heater press	$p$	bar	13,43325
17	Outlet HP Heater #2 temp	$t$	°C	183,6
18	Outlet HP Heater #2 press	$p$	bar	113,39325
19	Outlet HP Heater #1 temp	$t$	°C	226,8
20	Outlet HP Heater #1 press	$p$	bar	111,21325
21	Outlet turbin extraction #1 press	$p$	Bar	30,70325
22	Outlet turbin extraction #1 temp	$t$	°C	383,8
23	Outlet turbin extraction #2 press	$p$	bar	15,87325
24	Outlet turbin extraction #2 temp	$t$	°C	338,4
25	Outlet turbin extraction #3 press	$p$	bar	9,07325
26	Outlet turbin extraction #3 temp	$t$	°C	268,2
27	Outlet turbin extraction #4 press	$p$	bar	2,27325
28	Outlet turbin extraction #4 temp	$t$	°C	158,9
29	Outlet turbin extraction #5 press	$p$	bar	1,29325
30	Outlet turbin extraction #5 temp	$t$	°C	97,8
31	Outlet turbin extraction #6 press	$p$	bar	0,46219
32	Outlet turbin extraction #6 temp	$t$	°C	74,4
33	Outlet drain heater #1 temp	$t$	°C	227
34	Outlet drain heater #2 temp	$t$	°C	189,7
35	Outlet drain heater #4 temp	$t$	°C	105,6
36	Outlet drain heater #5 temp	$t$	°C	101,1
37	Outlet drain heater #6 temp	$t$	°C	76,7
38	Desuperheater flow	$M_{desh}$	t/h	50,44

### 3.3. Menentukan Parameter Tingkat Keadaan

Parameter utama yang akan ditentukan adalah entalpi, entropi dan volume spesifik berdasarkan parameter dasar yaitu temperature dan pressure. Data tersebut didapat dari *saturated steam table* dan *superheated steam table*, yang kemudian digunakan untuk menghitung besaran energi pada tiap tingkat keadaan



Gambar 3.1 Instalasi PLTU Sebalang



Gambar 3.2 Diagram T-s PLTU Sebalang

### 3.3.1 Tingkat Keadaan No. 1

Dimulai dari bagian masuk turbin dalam bentuk fasa uap kering atau superheater steam.

Tabel 3.2 Interpolasi Tingkat Keadaan 1

No	Temp	Press	Entalpi (h)	Entropi (s)
1	535 °C,	80 bar	3484.3	6.8321
2	535 °C,	94 bar	?	?
3	535 °C,	100 bar	3462.93	6.7088

Maka diperoleh :  $h_1 = 3469,34625 \text{ kJ/kg} = 828.6391 \text{ kcal/kg}$   
 $s_1 = 6,74579 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.6112 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$

### 3.3.2 Tingkat Keadaan No. 2

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat pertama atau *High Pressure Turbin (HPT)* yaitu *Extraction no 1* yang berfungsi untuk media pemanas tertutup air pengisi (*HP Heater No 1*). Ditetapkan

$p_2 = 29,69 \text{ bar}$  dan  $t_2 = 383,8 \text{ }^\circ\text{C}$  ; maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap panas lanjut (*superheated*), sehingga diperoleh :

$$h_2 = 3193,9526 \text{ kJ/kg} = 762.8624 \text{ kcal/kg dan}$$

$$s_2 = 6,8731 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.6416 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

### 3.3.3 Tingkat Keadaan No. 3

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat pertama atau *High Pressure Turbin (HPT)* yaitu *Extraction no 2* yang berfungsi untuk media pemanas tertutup air pengisi (*HP Heater No 2*). Ditetapkan  $p_3 = 15,87 \text{ bar}$  dan  $t_3 = 338,4^\circ\text{C}$ , maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap panas lanjut (*superheated*), sehingga diperoleh

$$h_3 = 3120,85 \text{ kJ/kg} = 745.4022 \text{ kcal/kg dan}$$

$$s_3 = 7,03425 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.6801 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

### 3.3.4 Tingkat Keadaan No. 4

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat pertama atau *High Pressure Turbin (HPT)* yaitu *Extraction no 3* yang berfungsi untuk media pemanas terbuka air pengisi (*Deaerator*). Ditetapkan  $p_4 = 9,07325 \text{ bar}$  dan  $t_4 = 268,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap panas lanjut (*superheated*), diperoleh  $h_4 = 2986,01 \text{ kJ/kg} = 713.1962 \text{ kcal/kg dan}$

$$s_4 = 7,05054 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.6839 \text{ kcal/kg.C}$$

### 3.3.5 Tingkat Keadaan No. 5

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat pertama atau *High Pressure Turbin (HPT)* yaitu *Extraction no 4* yang berfungsi untuk media pemanas tertutup air pengisi (*LP heater no 4*). Ditetapkan  $p_5 = 2,27325 \text{ bar}$  dan  $t_5 = 158,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap panas lanjut (*superheated*), diperoleh  $h_5 = 2785,49 \text{ kJ/kg} = 665.3028 \text{ kcal/kg dan}$   $s_5 = 7,26125 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.7343 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$ .

### 3.3.6 Tingkat Keadaan No. 6

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat kedua atau *Low Pressure Turbine (LPT)* stage pertama, yaitu *Extraction no 5* yang berfungsi untuk media pemanas tertutup air pengisi (*LP heater no 5*). Ditetapkan  $p_6 = 1,29325 \text{ bar}$  dan  $t_6 = 97,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap basah (*saturated steam*), diperoleh :

$$h_6 = 2672,09 \text{ kJ/kg} = 638.2177 \text{ kcal/kg dan}$$

$$s_6 = 7,38068 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.7628 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

### 3.3.7 Tingkat Keadaan No. 7

Menentukan entalpi spesifik dibagian keluaran turbin tingkat kedua atau *Low Pressure Turbin (LPT)* stage terakhir, yaitu *Extraction no 6* yang berfungsi untuk media pemanas tertutup air pengisi (*LP heater no 6*). Ditetapkan  $p_7 = 0,4621 \text{ bar}$  dan  $t_7 = 74,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , maka didapat bahwa uap berada dalam kondisi uap basah (*saturated steam*), diperoleh :

$$h_7 = 2634,28 \text{ kJ/kg} = 629.1869 \text{ kcal/kg dan}$$

$$s_7 = 7,6898 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C.} = 1.8366 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

### 3.3.8 Tingkat Keadaan No. 8

Pada kondisi 8  $p_8 = 0,17488 \text{ bar}$  dan  $s_8 = s_1$ , entropi spesifiknya konstan untuk ekspansi yang adiabatik dan reversibel secara internal melalui turbin.

Sehingga didapat  $h_{f8} = 236,436 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_{fg8} = 2367,2176 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_{f8} = 0,7861 \text{ kJ/kg.K}$  dan  $s_{g8} = 7,9692 \text{ kJ/kg.K}$ . Kualitas pada kondisi 8;  $x_8 = 0,8297$

dan entalpinya  $h_8 = 525.5843 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.9 Tingkat Keadaan No. 9

Kondisi 9 adalah cairan jenuh, pada  $p_9 = 0,17488 \text{ bar}$ , maka di dapat

$$h_{f9} = 236,436 \text{ kJ/kg} = 56.4717 \text{ kcal/kg dan } v_f = 1,0154416 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

### 3.3.10 Tingkat Keadaan No. 10

Kodisi ini ditetapkan oleh tekanan *Condensate pump* dan entropi spesifik

$$s_{10} = s_9. \text{ Entalpi spesifik } h_{10} = 237,2196 \text{ kJ/kg} = 56.6589 \text{ kcal/kg}$$

### 3.3.11 Tingkat Keadaan No. 11

Entalpi spesifik dari air yang mengalir keluar dari LP Heater No. 6 pada pressure  $p_{11} = 13,43325 \text{ bar}$  dan temperaturnya  $t_{11} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$  diperoleh  $h_{f11} = 242,77 \text{ kJ/kg}$  dan  $v_{f11} = 1,01616 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan  $p_{sat} = 0,18268$  dan akhirnya harga  $h_{11} = 244,1164 \text{ kJ/kg} = 58.3062 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.12 Tingkat Keadaan No. 12

Entalpi spesifik dari air yang mengalir keluar dari LP Heater no 5 pada pressure  $p_{12} = 13,43325 \text{ bar}$  dan temperaturnya  $t_{12} = 97,5 \text{ }^\circ\text{C}$  didapat harga  $h_{f12} = 408,5 \text{ kJ/kg}$  dan  $v_{f12} = 1,0416 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan  $p_{sat} = 0,92985 \text{ bar}$  dan  $h_{12} = 409,8022 \text{ kJ/kg} = 97.8795 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.13 Tingkat Keadaan No. 13

Entalpi spesifik dari air yang mengalir keluar dari LP Heater No. 4 pada pressure  $p_{13} = 13,43325 \text{ bar}$  dan temperaturnya  $t_{13} = 98,5$  dengan  $h_{f13} = 412,716 \text{ kJ/kg}$  dan  $v_{f13} = 1,04236 \text{ m}^3/\text{kg}$  serta  $p_{sat} = 0,96345$  maka diperoleh  $h_{13} = 414,0158 \text{ kJ/kg} = 98.8859 \text{ kcal/kg}$ .

### 3.3.14 Tingkat Keadaan No. 14

Cairan pada kondisi ini merupakan cairan jenuh keluaran Deaerator, artinya feed water bersinggungan langsung dengan uap extraction. Dimana  $t_{13} = 125,3 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $p_{13} = 3,323325 \text{ bar}$ , dan  $h_{f14} = 576,24899 \text{ kJ/kg} = 137.6347 \text{ kcal/kg}$  dan  $v_{f14} = 1,0766911 \text{ m}^3/\text{kg} \times 10^3$ .

### 3.3.15 Tingkat Keadaan No. 15

Pada kondisi ini  $p_{15} = 125,71325 \text{ bar}$  dan  $t_{15}=t_{14}=125,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , nilai entalpi spesifik  $h_{15} = 589,4266 \text{ kJ/kg} = 140.7821 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.16 Tingkat Keadaan No. 16

Entalpi spesifik dari air yang mengalir keluar dari HP Heater No 2 dengan pressure  $p_{16} = 113,39325 \text{ bar}$  dan temperaturnya  $t_{16} = 183,6 \text{ }^\circ\text{C}$  diperoleh  $h_{f16} = 779,204 \text{ kJ/kg}$  dan  $v_{f16} = 1,13244 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan  $p_{sat} = 10,9272$  maka Entalpi spesifik  $h_{16} = 790,8076 \text{ kJ/kg} = 188.8811 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.17 Tingkat Keadaan No. 17

Entalpi spesifik air yang mengalir keluar dari *HP Heater No 1* dengan pressure  $p_{17} = 111,21325 \text{ bar}$  dan temperaturnya  $t_{17} = 226,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , diperoleh  $h_{f17} = 975,24 \text{ kJ/kg}$  dan  $v_{f17} = 1,1429984 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan  $p_{sat17} = 26,4236 \text{ bar}$  maka Entalpi spesifik  $h_{17} = 984,9314 \text{ kJ/kg} = 235.2468 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.18 Tingkat Keadaan No. 18

Kondensat yang meninggalkan *Drain HP Heater No 1* berada pada kondisi cairan jenuh dengan  $t_{18} = 227 \text{ }^\circ\text{C}$ , sehingga harga  $h_{f18} = 976,17 \text{ kJ/kg} = 233.1541 \text{ kcal/kg}$

### 3.3.19 Tingkat Keadaan No. 19

Kondensat yang meninggalkan *Drain HP Heater No 2* berada pada kondisi cairan jenuh dengan  $t_{19} = 189,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , didapat  $h_{f19} = 806,288 \text{ kJ/kg} = 192.5785 \text{ kcal/kg}$ .

### 3.3.20 Tingkat Keadaan No. 20

Kondensat yang meninggalkan *Drain LP Heater No 4* berada pada kondisi cairan jenuh dengan  $t_{20} = 105,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , didapat :  $h_{f20} = 442,7056 \text{ kJ/kg} = 105.7384 \text{ kcal/kg}$ .

### 3.3.21 Tingkat Keadaan No. 21

Kondensat yang meninggalkan *Drain LP Heater No 5* merupakan cairan jenuh dengan  $t_{21} = 101,1 \text{ }^\circ\text{C}$  sehingga didapat :  $h_{f21} = 424,2631 \text{ kJ/kg} = 101.3335 \text{ kcal/kg}$ .

### 3.3.22 Tingkat Keadaan No. 22

Kondensat yang meninggalkan *Drain LP Heater No 6* juga merupakan cairan jenuh dengan  $t_{21} = 76,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , sehingga didapat  $h_{f21} = 321.0632 \text{ kJ/kg} = 76.6846 \text{ kcal/kg}$ .

### 3.3.23 Tingkat Keadaan No. 23

Kondisi ini terletak antara HP turbin dan LP turbin dimana  $p_{23} = 1 \text{ bar}$  dan  $s_{23} = s_1$ ,  $sf_{23} = 1,3026 \text{ kJ/kg.k}$ ,  $sg_{23} = 7,3594 \text{ kJ/kg.k}$ ,  $hf_{23} = 417,46 \text{ kJ/kg}$ , dan  $hg_{23} = 2675.5 \text{ kJ/kg}$ , kualitas pada kondisi ini adalah:  $x_{23} = 0,8986$   $h_{23} = 2821.6643 \text{ kJ/kg} = 673.9429 \text{ kcal/kg}$

### 3.4. Menghitung Nilai Fraksi Dan Massa

#### 3.4.1 Fraksi $y_2$ dan Massa $m_2$

Fraksi  $y_2$  dapat di tentukan melalui penerapan kesetimbangan laju massa dan energi pada volume atur yang melingkupi HP Heater No 1. Maka diperoleh :  $y_2 = 0,08753$  dan  $m_2 = 9,7741$  kg/s

#### 3.4.2 Fraksi $y_3$ dan Massa $m_3$

Fraksi  $y_3$  dapat di tentukan melalui penerapan kesetimbangan laju massa dan energi pada volume atur yang melingkupi HP Heater No 2, maka diperoleh :  $y_3 = 0,087$  dan  $m_3 = 9,715$  kg/s

#### 3.4.3 Fraksi $y_4$ dan Massa $m_4$

Fraksi dari aliran total yang dialihkan ke pemanas terbuka  $y_4 = m_4/m_1$  atau  $E_{in} = E_{out}$ , dimana  $m_1$  menyatakan laju aliran massa yang memasuki HP turbin dan  $m_4$  menyatakan laju aliran massa yang keluar dari ekstraksi no 3 menuju ke Deaerator, maka  $y_4$ :

$$y_4 = \frac{(1 - y_2 - y_3)h_{13} + (y_2 + y_3)h_{19} - h_{14}}{h_{13} - h_4}$$

$$y_4 = 0,03645$$

Dan

$$m_4 = m_1 \times y_4$$

$$m_4 = 111,6667 \text{ kg/s} \times 0,03645$$

$$m_4 = 4,0702 \text{ kg/s}$$

#### 3.4.4 Fraksi $y_5$ dan Massa $m_5$

Fraksi dari aliran total yang dialihkan ke pemanas tertutup  $y_5 = m_5/m_1$  atau  $E_{in} = E_{out}$ , dimana  $m_1$  menyatakan laju aliran massa yang memasuki HP turbin dan  $m_5$  menyatakan laju aliran massa yang keluar dari ekstraksi no 5 menuju ke LP Heater no 4.

$$y_5 = \frac{h_{13} - h_{12}}{h_5 - h_{20}} = \frac{414,0158 - 409,8022}{2785,49 - 442,7056}$$

$$y_5 = 0,00179854$$

Dan

$$m_5 = m_1 \times y_5$$

$$m_5 = 111,6667 \text{ kg/s} \times 0,00179854$$

$$m_5 = 0,200837 \text{ kg/s}$$

### 3.4.5 Fraksi $y_6$ dan Massa $m_6$

Fraksi dari aliran total yang dialihkan ke pemanas tertutup  $y_6 = m_6/m_1$  atau  $E_{in} = E_{out}$ , dimana  $m_1$  menyatakan laju aliran massa yang memasuki *HP turbine* dan  $m_6$  menyatakan laju aliran massa yang keluar dari ekstraksi no 6 menuju ke *LP Heater no 5*.

$$y_6 = \frac{h_{12}-h_{11}}{h_6-h_{21}} = \frac{409,8022-244,1164}{(2672,09-424,2631)}$$

$$y_6 = 0,0737$$

Dan

$$m_6 = m_1 \times y_6$$

$$m_6 = 111,6667 \text{ kg/s} \times 0,0737$$

$$m_6 = 8,2298 \text{ kg/s}$$

### 3.4.6 Fraksi $y_7$ dan Massa $m_7$

Fraksi dari aliran total yang dialihkan ke pemanas tertutup  $y_7 = m_7/m_1$  atau  $E_{in} = E_{out}$ , dimana  $m_1$  menyatakan laju aliran massa yang memasuki *HP turbine* dan  $m_7$  menyatakan laju aliran massa yang keluar dari ekstraksi no 7 menuju ke *LP Heater no 6*.

$$y_7 = \frac{h_{11}-h_{10}}{(h_7-h_{22})} = \frac{244,1164-237,2196}{(2634,28-321,0632)}$$

$$y_7 = 0,002981$$

Dan

$$m_7 = m_1 \times y_7$$

$$m_7 = 111,6667 \text{ kg/s} \times 0,002981$$

$$m_7 = 0,3328 \text{ kg/s}$$

### 3.4.7 Fraksi $y_{23}$ Dan Massa $m_{23}$

Jika fraksi dari aliran total kemudian di ekstraksikan yang kemudian pada kondisi ekstraksi tersebut diwakili oleh variable  $y$ . maka massa yang keluar dari turbin tingkat pertama adalah:

$$y_{23} = 1 - y_2 - y_3 - y_4 - y_5$$

$$y_{23} = 1 - 0,08753 - 0,087 - 0,03645 - 0,00179854$$

$$y_{23} = 0,78902$$

Dan

$$m_{23} = y_{23} \times m_1$$

$$m_{23} = 0,78902 \times 111,6667 \text{ kg/s}$$

$$m_{23} = 88,1072 \text{ kg/s}$$



### 3.4.8 Fraksi $y_8$ Dan Massa $m_8$

Kondisi ini berada pada keluaran turbin tingkat terakhir, dimana laju aliran massa setelah dimanfaatkan untuk memutar turbin akan dikondensasikan di kondensor, maka:

$$y_8 = 1 - y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 - y_7$$

$$y_8 = 1 - 0,08753 - 0,087 - 0,03645 - 0,00179854 - 0,0737 - 0,002981$$

$$y_8 = 0,71054$$

Dan

$$m_8 = y_8 \times m_1$$

$$m_8 = 0,71054 \times 111,6667 \text{ kg/s}$$

$$m_8 = 79,3437 \text{ kg/s}$$

**Tabel 3.3** Parameter Tiap Tingkat Keadaan

Tingkat	$h$ (kJ/kg)	$H_f$ (kJ/kg)	$S$ (kJ/kg. °C.)	$V_f \times 10^3$	$m$ (kg/s)
1	3469,34625	-	6,74579	-	111,6667
2	3193,9526	-	6,8731	-	9,7741
3	3120,85	-	7,03425	-	9,715
4	2986,01	-	7,05054	-	4,0702
5	2785,49	-	7,26125	-	0,200837
6	2672,09	-	7,38068	-	8,2298
7	2634,28	-	7,6898	-	0,3328
8	2200,5164	-	6,74579	-	88,1072
9	-	236,436	-	1,0154416	-
10	237,2196	-	-	-	-
11	244,1164	242,77	-	1,01616	-
12	409,802	408,5	-	1,0416	-
13	414,0158	412,716	-	1,04236	-
14	-	576,2489	-	1,0766	-
15	790,8076	779,204	-	1,13244	-
16	790,8076	779,204	-	1,13244	-
17	984,9314	975,24	-	1,1429984	-

18	-	976,17	-	-	-
19	-	806,288	-	-	-
20	-	442,7056	-	-	-
21	-	424,2631	-	-	-
22	-	321.0632	-	-	-
23	2821.66	-	-	-	88,1072

### 3.5. Menghitung Kerja Turbin

Uap dari boiler yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berexpansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondensor pada kondisi dengan tekanan dan temperatur yang relatif rendah.

#### 3.5.1 Menghitung Kerja *High Pressure Turbine* ( $W_{THP}$ )

Nilai kerja dan perpindahan kalor dinyatakan berdasarkan unit massa yang masuk kedalam turbin tingkat pertama (HP turbin). Kerja dihasilkan oleh turbin pertama perunit massa yang masuk adalah:

$$\begin{aligned}
 W_{Thp} &= (m_1xh_1) - (m_2xh_2) - (m_3xh_3) - (m_4xh_4) - (m_5xh_5) - (m_{23}xh_{23}) \\
 &= (88,1072 \text{ kg/s} \times 2821.6643 \text{ kJ/kg}) \\
 &= 64581,71743 \text{ kJ/s} = 15425,0848 \text{ kcal/s} = 64,58171743 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

#### 3.5.2 Menghitung Kerja *Low Pressure Turbine* ( $W_{TLP}$ )

Nilai kerja dan perpindahan kalor dinyatakan berdasarkan unit massa yang masuk kedalam turbin tingkat kedua.(LP turbin). Kerja yang dihasilkan oleh turbin kedua perunit massa yang masuk adalah:

$$\begin{aligned}
 W_{TLP} &= (m_{23}xh_{23}) - (m_6xh_6) - (m_7xh_7) - (m_8xh_8) \\
 W_{TLP} &= 51144,37306 \text{ kJ/s} = 12215.6289 \text{ kcal/s} = 51,14437306 \text{ MW}.
 \end{aligned}$$

### 3.6. Menghitung Kerja Pompa

Kondensat cair yang meninggalkan kondensor dipompakan dengan dua tahap, yakni menggunakan pompa kondensat dan pompa feet boiler.

#### 3.6.1 Menghitung Kerja Pompa Condensat ( $W_{CP}$ )

Dengan menggunakan kestimbangan laju massa dan energi dengan  $m_{10} = 304,1 \text{ t/h} = 84,4722 \text{ kg/s}$ , Maka kerja pompa condensat pump:

$$W_{cp} = m (h_{10} - h_9)$$

$$W_{cp} = 84,4722 \text{ kg/s} (237,2196 \text{ kJ/kg} - 236,436 \text{ kJ/kg})$$

$$W_{cp} = 66,1924 \text{ kJ/s} = 15,80979 \text{ kcal/s} = 0,0661924 \text{ MW}$$

### 3.6.2 Menghitung Kerja Pompa Feed Boiler ( $W_{BFP}$ )

Pada kondisi ini pompa memompakan air deaerasi menuju Boiler yang kemudian dirubah menjadi saturated steam bertekanan tinggi.

Dengan  $m_{15} - m_{desh} = 450 \text{ t/h} = 125 \text{ kg/s}$ , maka kerja *Boiler Feed Pump*:

$$W_{BFP} = m (h_{15} - h_{14})$$

$$W_{BFP} = 125 \text{ kg/s} (589,4266 \text{ kJ/kg} - 576,24899 \text{ kJ/kg})$$

$$W_{BFP} = 1647,20125 \text{ kJ/s} = 393.4274 \text{ kcal/s} = 1,64720125 \text{ MW}.$$

## 3.7. Perhitungan Panas Masuk ( $Q_{in}$ ) dan Panas Keluar ( $Q_{out}$ )

### 3.7.1 Perhitungan Panas Masuk ( $Q_{in}$ )

Tara kalor yang ditambahkan adalah jumlah dari energi yang ditambahkan melalui perpindahan kalor selama melewati Boiler mulai dari *ekonomizer, boiler drum, wall tube, boiler drum, low temperature superheater dan terakhir high temperature super heater*. Dengan menggunakan kesetimbangan laju massa dan energi menghasilkan:

$$Q_{in} = m_{17} (h_1 - h_{17})$$

$$Q_{in} = 125 \text{ kg/s} (3469,34625 \text{ kJ/kg} - 984,9314 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{in} = 310551.8563 \text{ kJ/s} = 74174.0686 \text{ kcal/s} = 310.5518563 \text{ MW}$$

### 3.7.2 Perhitungan Panas Keluar ( $Q_{out}$ )

Kondisi ini merupakan laju perpindahan energi dari fluida kerja ke air pendingin perunit massa fluida kerja yang melalui kondensor.

$$Q_{out} = m_8 (h_8 - h_9)$$

$$Q_{out} = 79,3437 \text{ kg/s} (2200,5164 \text{ kJ/kg} - 236,436 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{out} = 155837,406 \text{ kJ/s} = 37221.1396 \text{ kcal/s} = 155,837406 \text{ MW}$$

### 3.8. Perhitungan Efisiensi termal

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja melalui boiler yang dikonversikan menjadi keluaran netto. Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama-sama dengan idealisasi

tersebut, maka:

$$\eta = \frac{(WThp+Wtlp)-(Wcp-Wbfp)}{Qin}$$

$$\eta = 0,367168$$

$$\eta = 36,72 \%$$

### 3.9. Perhitungan Konsumsi Batubara

Untuk beban 100 MW dengan nilai efisiensi kondisi aktual sebesar 36.7168 %, dengan ketetapan bahwa  $1 kWh = 860 kcal$ , nilai kalori batubara sebesar  $4052 kcal/kg$  dan beroperasi selama 24 jam, maka jumlah pemakaian batubara dalam sehari adalah:

$$pemakaian\ batubara = \frac{beban \times 24\ jam \times 1000}{efisiensi} \times 860\ kcal \times \frac{1}{kalori\ batubara}$$

$$pemakaian\ batubara = \frac{100MW \times 24\ jam \times 1000}{0.367168} \times 860\ kcal \times \frac{1}{4052}$$

$$pemakaian\ batubara = 1387316.119kg/day = 1387.316119\ ton/day$$

### 3.10. Analisis Hasil Perhitungan

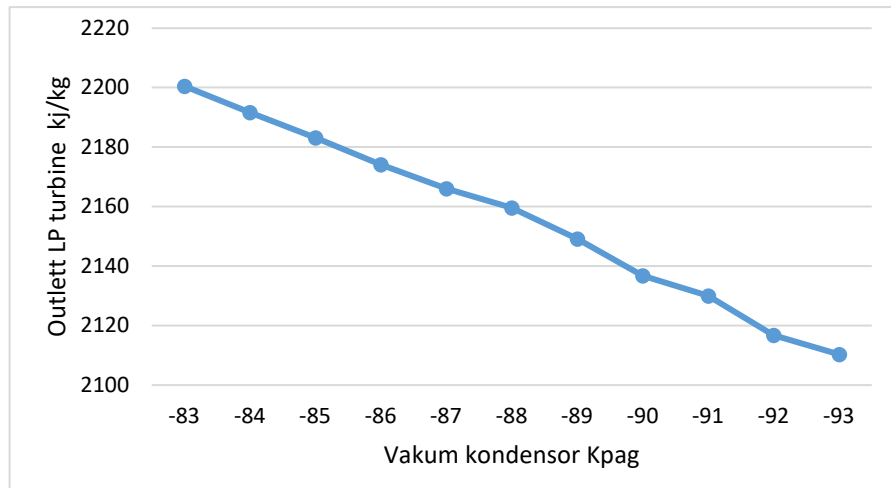
**Tabel 3.4** Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Condensor

Press vakum kpa (g)	Press vakum bar (abs)	Hasil perhitungan					
		$h_8$ (kj/kg)	$h_8$ (kcal/kg)	$h_9$ (kj/kg)	$h_9$ (kcal/kg)	$Q_{out}$ (MW)	$T_9$ (°C)
-83,837	0,17488	2200,5164	525.584	236,436	56.4718	155,8374	54.45
-84,837	0,16488	2191.6904	523.476	230.479	55.049	155.6097	55.05
-85,837	0,15488	2183.1042	521.425	224.522	53.6262	155.4011	53.63
-86,837	0,14488	2174.1144	519.278	218.565	52.2034	153.7425	52.21
-87,837	0,13488	2166.0298	517.347	212.598	50.7782	154.9925	50.78
-88,837	0,12488	2159.6196	515.816	206.651	49.3577	154.9557	49.35
-89,837	0,11488	2149.1679	513.32	200.694	47.9347	154.5991	47.93
-90,837	0,10488	2136.7164	510.346	191.830	45.8178	154.3144	46.51

-91,837	0,09488	2129.9579	508.732	187.2348	44.7203	154.1428	44.71
-92,837	0,08488	2116.7902	505.587	178.2593	42.5765	153.8102	42.55

### 3.10.2 Pengaruh Terhadap Entalpi *Outlet LP Turbine*.

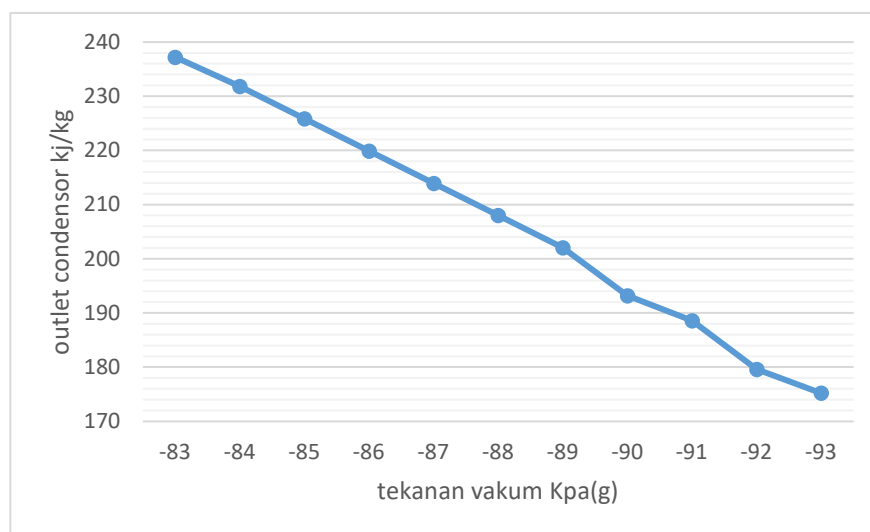
Dari Tabel 3.4 dapat dibuat grafik pengaruh tekan vakum kondensor terhadap entalpi outlet low pressure turbin.



**Gambar 3.3** Grafik Pengaruh Tekanan Vakum pada Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Low Pressure Turbin.

Untuk nilai entalpi *Outlet Low Pressure Turbine* terlihat dari gambar 3.3 Tekanan vakum -83 Kpa(g) maka nilai entalpinya 2200,51 kJ/kg dan tekanan vakum -93 Kpa(g) maka nilai entalpinya 2110,29 kJ/kg.

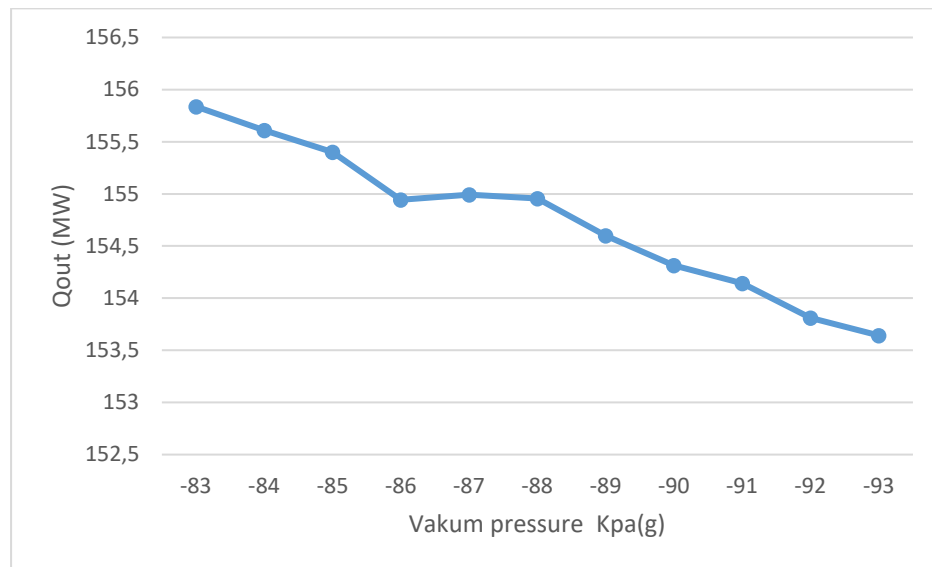
### 3.10.3 Pengaruh Terhadap Entalpi *Outlet Kondensor*



**Gambar 3.4** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Kondensor.

Untuk nilai entalpi terlihat dari gambar 3.5 adanya pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap nilai entalpi *inlet condensate pump* atau *Entalpi Outlet Kondensor* . Pada tekanan vakum  $-83 \text{ Kpa(g)}$  maka nilai entalpi *inlet condensate pump* sebesar  $236,436 \text{ kJ/kg}$  dan pada tekanan vakum  $-93 \text{ Kpa(g)}$  maka nilai entalpi *inlet condensate pump* sebesar  $173.88 \text{ kJ/kg}$  sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin turun tekanan vakum, maka nilai entalpi *inlet condensate pump* semakin besar dengan kenaikan rata – rata sebesar  $9 \text{ kJ/kg}$ . Hal ini terjadi karena akibat tekanan kondensor yang semakin naik, maka suhu jenuh di kondensor naik sehingga menyebabkan entalpi keluar kondensor juga naik akibat penurunan tekanan vakum dan nilai entalpi sangat berpengaruh terhadap parameter suhu dan tekanan.

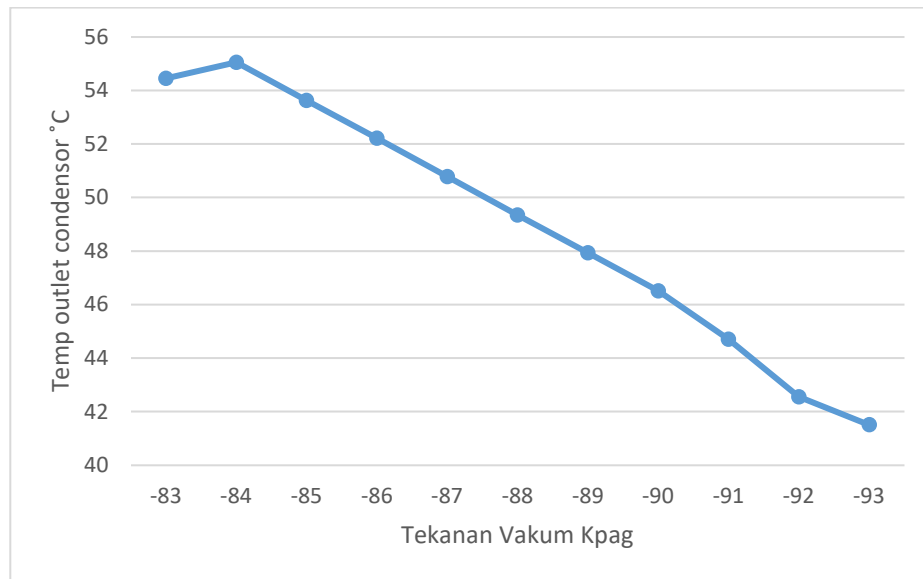
#### 3.10.4 Pengaruh Terhadap Panas Keluar ( $Q_{out}$ )



**Gambar 3.5** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap  $Q_{out}$  pada Kondensor.

Untuk  $Q_{out}$  pada kondensor sangat dipengaruhi oleh entalpi inlet dan outlet kondensor yang langsung di pengaruhi oleh tekanan vakum. Maka pada tekanan vakum  $-83 \text{ kpa(g)}$  nilai  $Q_{out}$   $155,8374 \text{ MW}$  dan pada tekanan vakum  $-93 \text{ Kpa(g)}$  maka nilai  $Q_{out}$  sebesar  $153,6425 \text{ MW}$ .

### 3.10.5 Pengaruh Terhadap Temperatur Outlet Kondensor



**Gambar 3.6** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Temperatur Outlet Kondensor

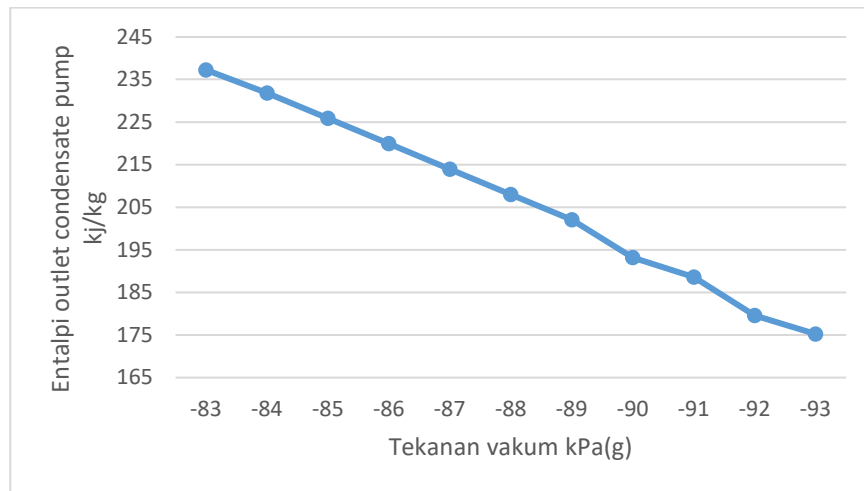
Dengan tekanan vakum  $-83 \text{ Kpa}(g)$  maka nilai suhu inlet condensate pump sebesar  $54.45^\circ\text{C}$  dan pada tekanan vakum  $-93 \text{ Kpa}(g)$  maka nilai suhu inlet condensate pump sebesar  $41.51^\circ\text{C}$ ; sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin turun tekanan vakum maka suhu inlet condensate pump akan semakin naik dengan rata – rata kenaikan sebesar  $1.29^\circ\text{C}$ .

### 3.10.6 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Kerja Condensor Pump

**Tabel 3.5** Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Kerja Condensor Pump

Press vakum kpa (g)	Press vakum bar (abs)	Hasil perhitungan					
		$h_{10}$ (kj/kg)	$h_{10}$ (kcal/kg)	$h_9$ (kj/kg)	$h_9$ (kcal/kg)	$W_{CP}$ (KW)	$T_9$ ( $^\circ\text{C}$ )
-83,837	0,17488	237,2196	56.6589	236,436	56.4718	66.1924	54.45
-84,837	0,16488	231.8283	55.3712	230.479	55.049	113.9774	55.05
-85,837	0,15488	225.8698	53.9481	224.522	53.6262	113.8516	53.63
-86,837	0,14488	219.9115	52.525	218.565	52.2034	113.8416	52.21
-87,837	0,13488	213.9459	51.1001	212.598	50.7782	113.8664	50.78
-88,837	0,12488	207.9991	49.6797	206.651	49.3577	113.8685	49.35
-89,837	0,11488	202.0421	48.2569	200.694	47.9349	113.8769	47.93
-90,837	0,10488	193.1782	46.1398	191.830	45.8178	113.8854	46.51
-91,837	0,09488	188.5829	45.0423	187.2348	44.7203	113.8769	44.71
-92,837	0,08488	179.61	42.8991	178.2593	42.5765	113.8659	42.55
-93,325	0,08	175.22	41.8406	173.880	41.5305	113.6425	41.51

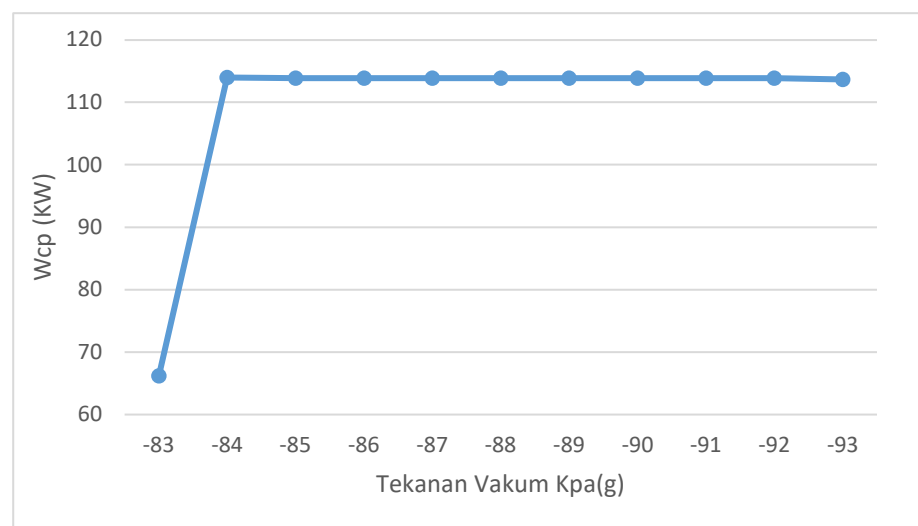
### 3.10.7 Pengaruh Terhadap Temperatur Outlet *Condensate Pump*



**Gambar 3.7** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Entalpi Outlet Condensat Pump

Pada tekanan vakum  $-83 \text{ kPa(g)}$  maka nilai entalpi *inlet condensate pump* sebesar  $237.2196 \text{ kJ/kg}$  dan pada tekanan vakum  $-93 \text{ kPa(g)}$  maka nilai entalpi *inlet condensate pump* sebesar  $175.22 \text{ kJ/kg}$  sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin turun tekanan vakum, maka nilai entalpi *outlet condensate pump* semakin kecil dengan kenaikan rata – rata sebesar  $6 \text{ kJ/kg}$ .

### 3.10.8 Pengaruh Terhadap Kerja *Condensate Pump*



**Gambar 3.8** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kondensor pump



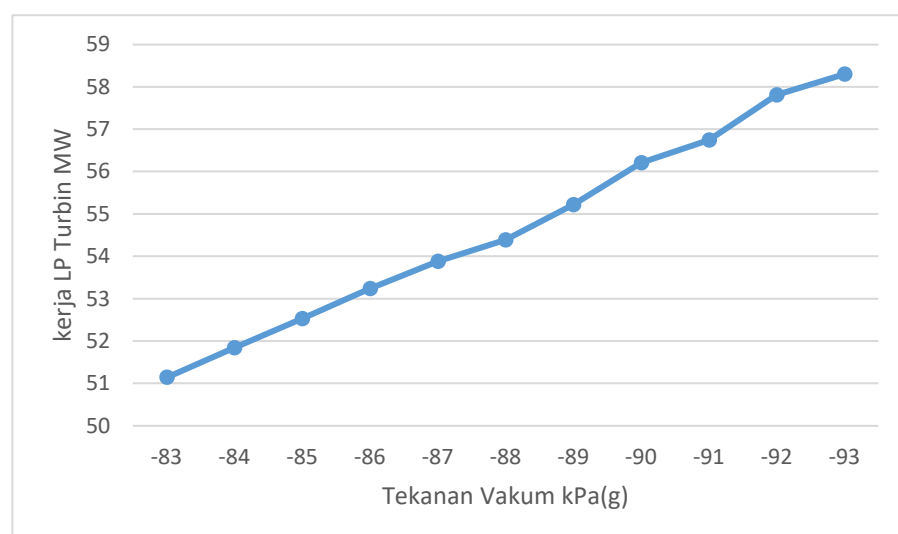
Untuk nilai entalpi terlihat dari gambar 4.6 adanya pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap nilai kerja *condensate pump*. Pada tekanan vakum  $-83 \text{ Kpa(g)}$  maka nilai kerja *condensate pump* sebesar  $66.19 \text{ KW}$  dan pada tekanan vakum  $-93 \text{ Kpa(g)}$  maka nilai kerja *condensate pump* sebesar  $113.64 \text{ KW}$  sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin turun tekanan vakum, maka nilai kerja *condensate pump* semakin besar.

### 3.11 Analisis Perubahan Vakum Terhadap Siklus PLTU

Tabel 3.6 Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap siklus PLTU

Press vakum (kpag)	Hasil perhitungan						
	$W_{TLP}$ (MW)	$W_{HP}$ (MW)	$W_{CP}$ (MW)	$W_{BFP}$ (MW)	$Q_{out}$ (MW)	Ef %	konsumsi batubara (ton/day)
-83,837	51,1443	64,5817	0,0661924	1,6472	155,8374	36.7168	1387,3161
-84,837	51.8446	64,5817	0.113977	1,6472	155.8374	36.9269	1379,4228
-85,837	52.5259	64,5817	0.1138516	1,6472	155.4011	37.1464	1371,2717
-86,837	53.2392	64,5817	0.1138516	1,6472	153.7425	37.3761	1362,8443
-87,837	53.8806	64,5817	0.113866	1,6472	154.9925	37.5826	1355,3561
-88,837	54.3892	64,5817	0.1138685	1,6472	154.9557	37.7464	1349,7476
-89,837	55.2185	64,5817	0.1138786	1,6472	154.5991	38.0135	1339,9925
-90,837	56.2065	64,5817	0.1138854	1,6472	154.3144	38.3317	1328,8691
-91,837	56.7427	64,5817	0.1138769	1,6472	154.1428	38.5044	1322,9087
-92,837	57.8065	64,5817	0.1138659	1,6472	153.8102	38.8471	1311,2383
-93,325	58,3026	64,5817	0.1138516	1,6472	153.6425	39.0067	1305,8733

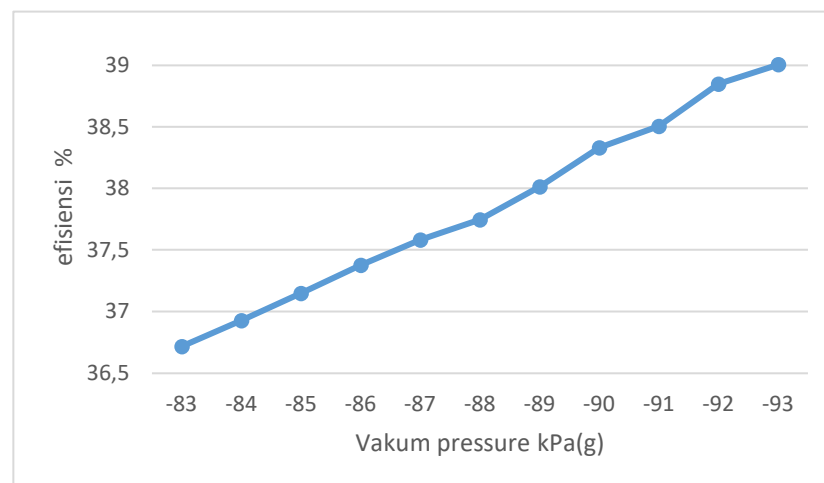
#### 3.11.1 Pengaruh Terhadap kerja LP Turbin



Gambar 3.9 Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap LP Turbin

Untuk kerja *low pressure* turbin terlihat dari gambar 3.10 pengaruh tekanan vakum terhadap kerja *low pressure turbine* dengan tekanan vakum  $-83\text{kPa(g)}$  maka besar kerja *low pressure turbine*  $51.1443\text{ MW}$  dan tekanan vakum  $-93\text{ kPa(g)}$  maka besar kerja *low pressure turbine* sebesar  $58.3026\text{ MW}$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin naik tekanan vakum kondensor maka pengaruh terhadap kerja *low pressure turbine* juga akan meningkat dengan selisih kenaikan rata-rata sebesar  $1\text{ MW}$ .

### 3.11.2 Pengaruh Terhadap Efisiensi Termal

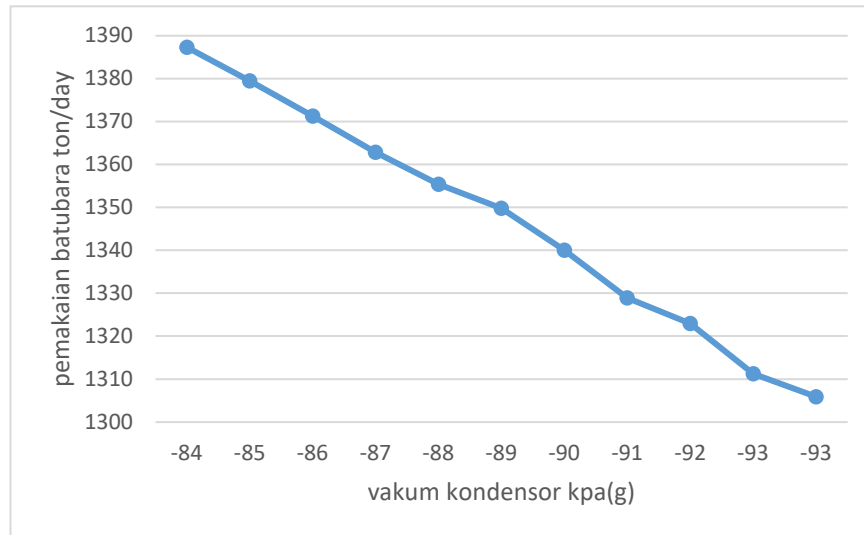


**Gambar 3.10** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Efisiensi Termal

Dari Gambar 3.11, dapat disimpulkan bahwa tekanan vakum pada kondensor semakin turun, maka efisiensi yang dihasilkan pembangkit akan meningkat. Pada  $T-s$  diagram dapat dilihat, apabila tekanan kondensor naik maka nilai  $h$ -nya semakin tinggi, hal ini menyebabkan  $\Delta h$  di turbin semakin kecil sehingga daya yang dihasilkan menurun. Penurunan tekanan vakum pada kondensor juga menyebabkan perubahan nilai parameter operasional di komponen lainnya. Hal ini menyebabkan nilai  $h$  di titik tersebut berubah sehingga apabila laju alir massa dibiarkan tetap, maka nilai  $Q$  total dan  $\dot{W}$  total semakin mengecil. Apabila nilai  $Q$  dan  $\dot{W}$  berubah semakin mengecil, maka nilai efisiensi pada pembangkit tersebut juga semakin kecil.

Dari hasil perhitungan juga didapat kesimpulan, bahwa setiap kenaikan 1  $Kpa(g)$  berakibat turunnya efisiensi pembangkit sebesar 0,2289 %.

### 3.11.3 Pengaruh Terhadap Pemakaian Batubara



**Gambar 3.11** Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Konsumsi Batubara

Berdasarkan grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa tekanan vakum pada kondensor semakin turun, maka pemakaian batubara semakin turun. Untuk menghasilkan daya listrik pada generator yang sama, maka dibutuhkan flow uap yang lebih besar. Flow uap lebih besar akan berhubungan dengan banyaknya batubara yang dibakar, dan banyak air yang dipanaskan di boiler. Dari hasil perhitungan juga didapat kesimpulan, bahwa setiap penurunan  $-1 Kpa(g)$  berakibat pada penurunan pemakaian batubara rata-rata sebesar  $8,14428 ton/day$ . Dan penurunan tekanan vakum sebesar  $-10 Kpa(g)$  terjadi penurunan pemakaian batubara sebesar  $81,4428 ton/day$ .

## BAB IV

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 4.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan terhadap kondensor, yang terpasang pada system Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang Unit Dua (2), maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Telah terjadi kenaikan tekanan vakum kondensor dari system pembangkit tenaga tersebut, sebesar kurang lebih  $-10 \text{ Kpa(g)}$  yakni dari tekanan desain sebesar  $-93 \text{ Kpa(g)}$  menjadi  $-83 \text{ Kpa(g)}$ .
2. Setiap kenaikan tekanan vakum kondensor sebesar  $1 \text{ Kpa(g)}$  menyebabkan turunnya efisiensi sebesar  $0,2289 \%$ . Dengan kata lain akibat penurunan tekanan vakum sebesar  $-10 \text{ Kpa(g)}$  maka menyebabkan efisiensi pembangkit daya akan turun sebesar kurang lebih  $2,289 \%$ .
3. Dampak lain yang terjadi pada produksi daya adalah, setiap penurunan tekanan vakum kondensor sebesar  $-1 \text{ Kpa(g)}$  terjadi kehilangan daya sebesar  $0,715 \text{ MW}$  pada *Low Pressure Turbine*; atau dengan penurunan tekanan vakum sebesar  $-10 \text{ Kpa(g)}$  maka daya akan turun sebesar  $7,15 \text{ MW}$ .
4. Pemakaian bahan bakar batu bara juga akan mengalami penurunan setiap penurunan  $-1 \text{ Kpa(g)}$  yakni sebesar  $8,14428 \text{ Ton/day}$ . Jadi jika tekanan vakum kondensor turun sebesar  $-10 \text{ Kpa(g)}$  maka akan terjadi penurunan pemakaian batubara sebesar  $81,4428 \text{ Ton/day}$ .

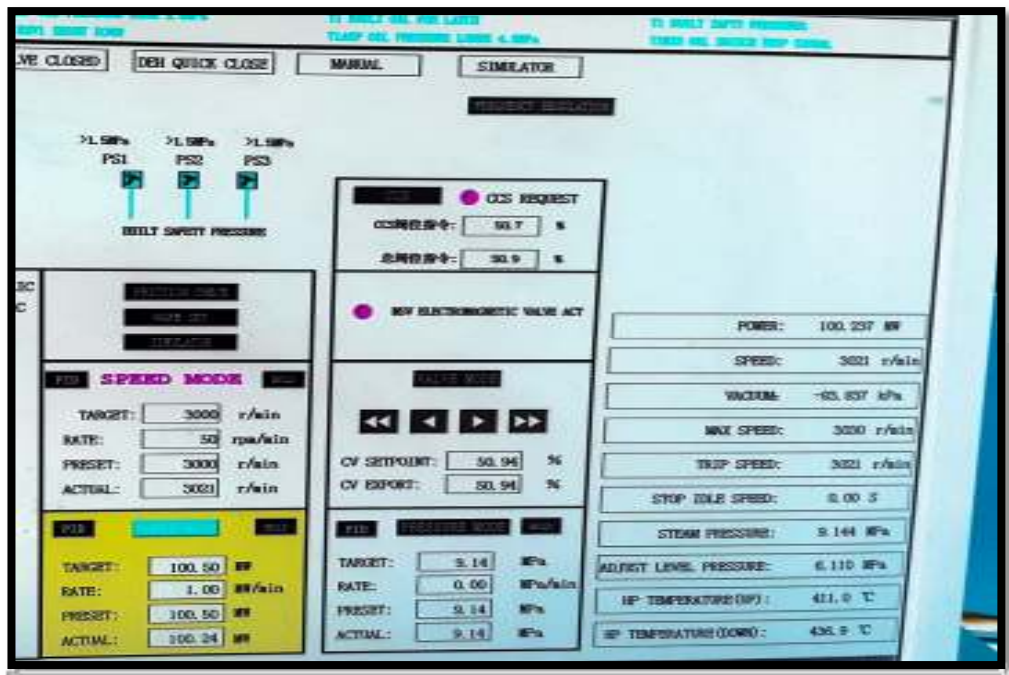
#### 5.1 Saran

1. Diharapkan adanya perhatian serius terhadap kenaikan tekanan vakum kondensor agar dapat mengurangi kerugian akibat perubahan tekanan vakum.
2. Agar dilakukan pengamatan secara rutin mengenai kenaikan tekanan vakum kondensor sehingga penanganan upaya-upaya dalam pencegahan kenaikan tekanan vakum dapat optimal.

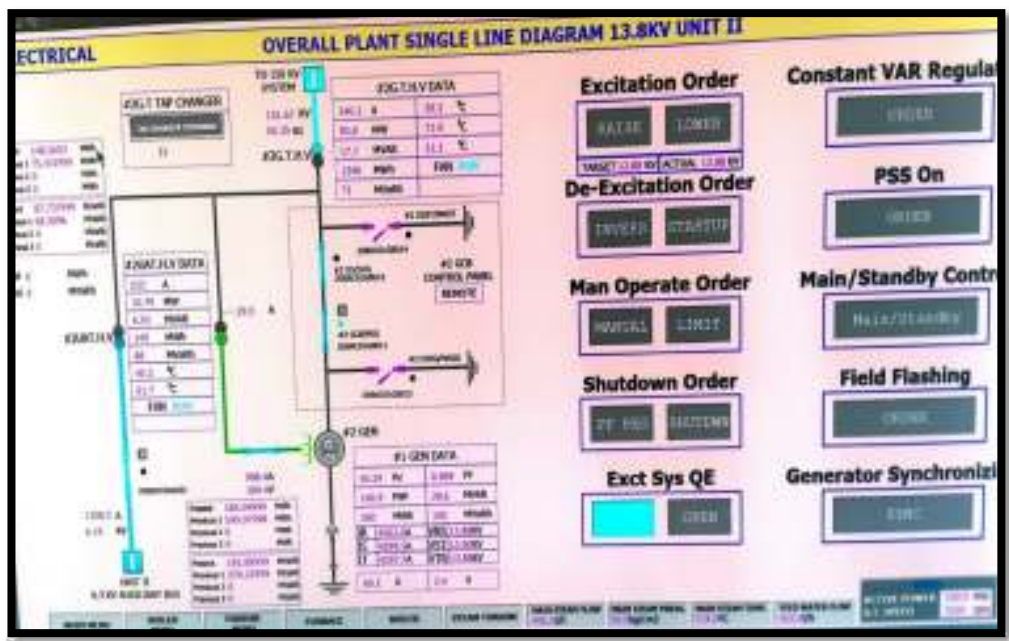
## DAFTAR PUSTAKA

1. Astu Pudjanarsa & Djati Nursuhud. 2013. *Mesin Konversi Energi*. Penerbit Adi Yogyakarta 2013.
2. Archie W. Culp & DarwiSitompul, 1991. *Prinsip – Prinsip Konversi Energi*. Penerbit Erlangga 1991.
3. Abdul Kadir, 1995. *Energi (Sumberdaya, Inovasi, Tenaga Listrik dan Potensi Ekonomi)*. Penerbit Universitas Indonesia 1995.
4. China Chang Jiang Energy Corp (Group). *Condensor Intruction*. Lampung 2008.
5. Djokosetyardjo. 2006. *Ketel Uap*. Penerbit PT Pradnya Paramita Jakarta 2006.
6. Djiteng Marsudi. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Penerbit Graha Ilmu Yogyakarta 2006.
7. Djiteng Marsudi. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik*. Penerbit Erlangga Jakarta 2011.
8. Pusat pendidikan dan Latihan. *Pengoprasian Turbin Dan Generator*. Jakarta: PT PLN (Persero).
9. Pembangkitan Sektor Sebalang. *Standard Operating Procedure (SOP)*. Lampung: PT PLN (Persero).
10. Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles. 2015. *Thermodynamics An Engeneering Approach Eight Edition*. Mc Graw Hill New York 2015.

Lampiran 1. Steam Turbine dan Line Diagram

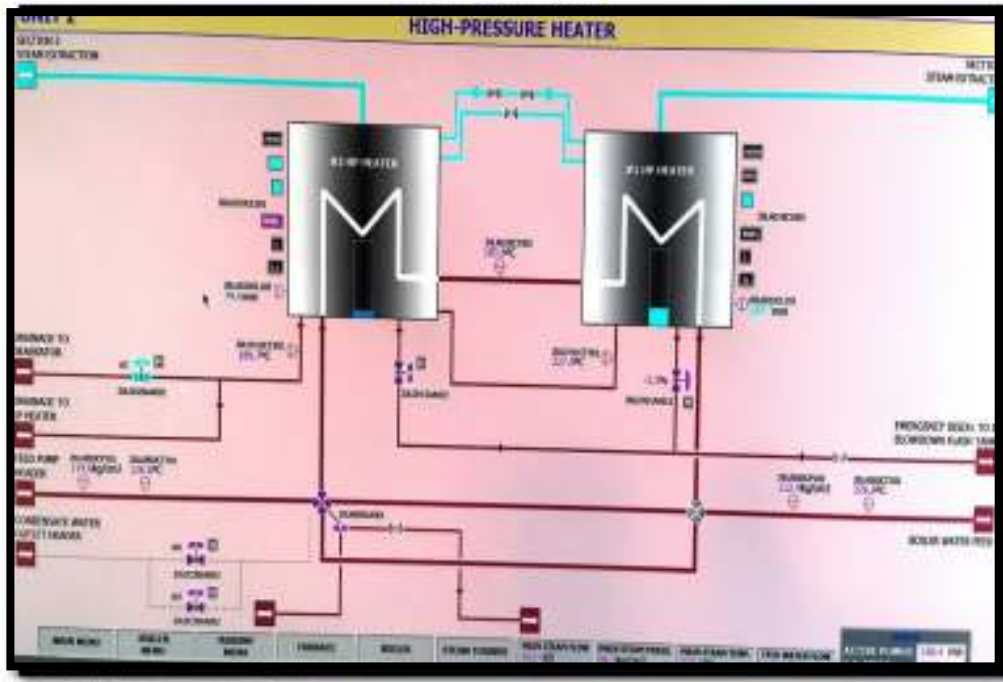


Gambar: Steam Turbine Digital Electro Hydraulic System

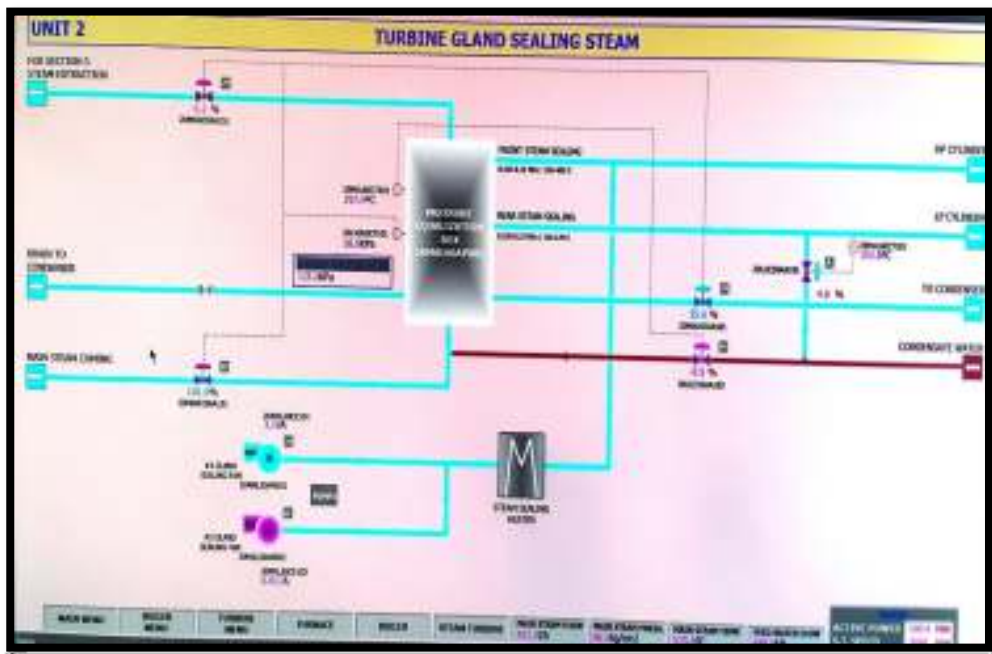


Gambar : Line Diagram 13.8 KV

**Lampiran 2. Circulation Water System dan Turbine Gland Sealing Steam**

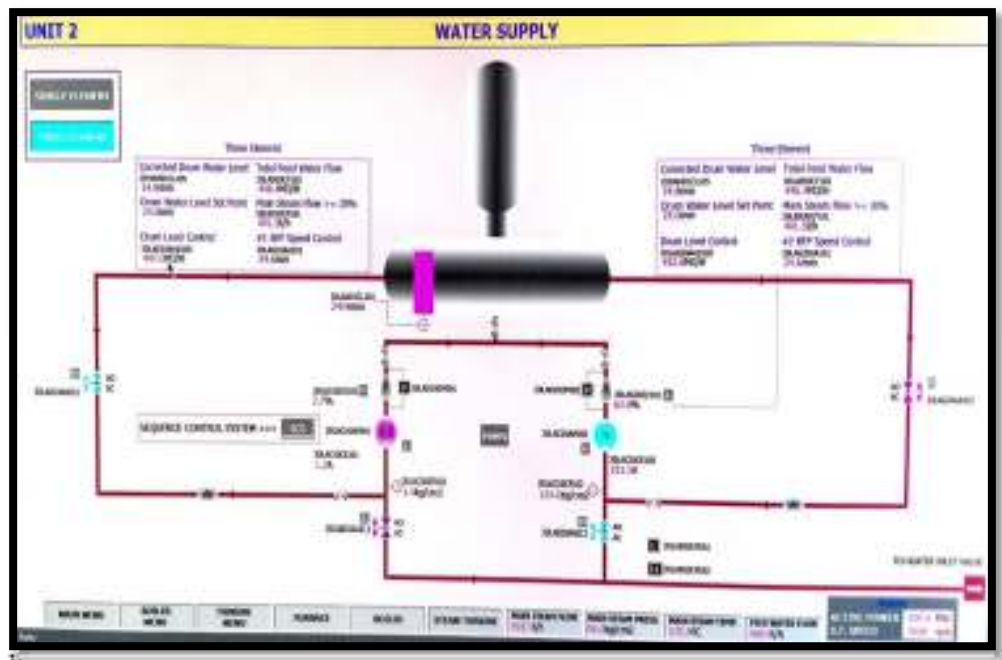


**Gambar : Circulation Water System**

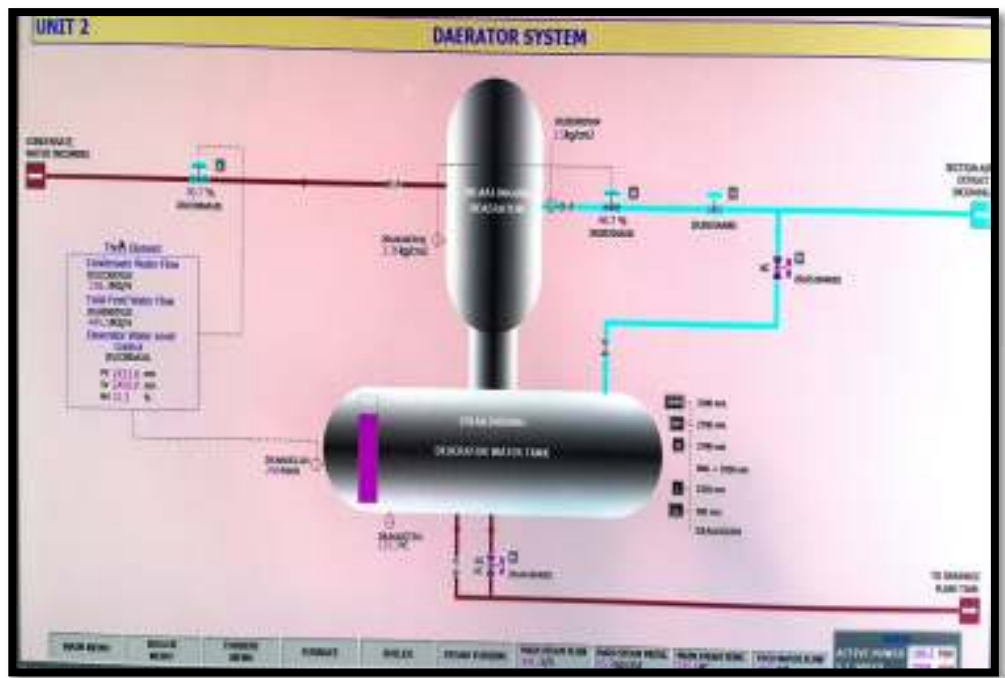


**Gambar : Turbine Gland Sealing Steam**

Lampiran 3. Feed Water Pump System dan Deaerator System



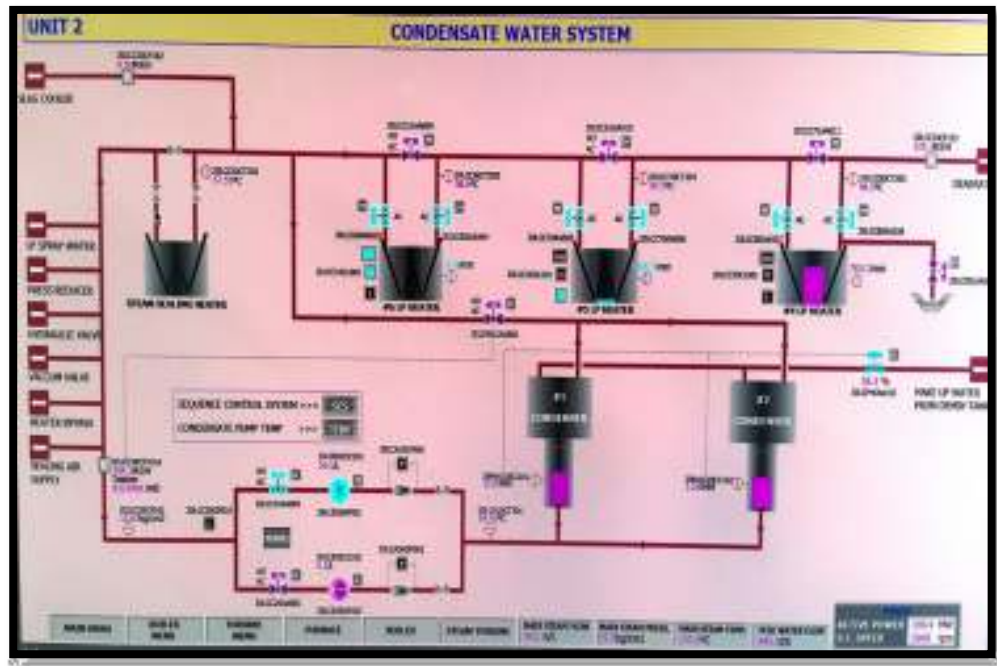
Gambar : Feed Water Pump System



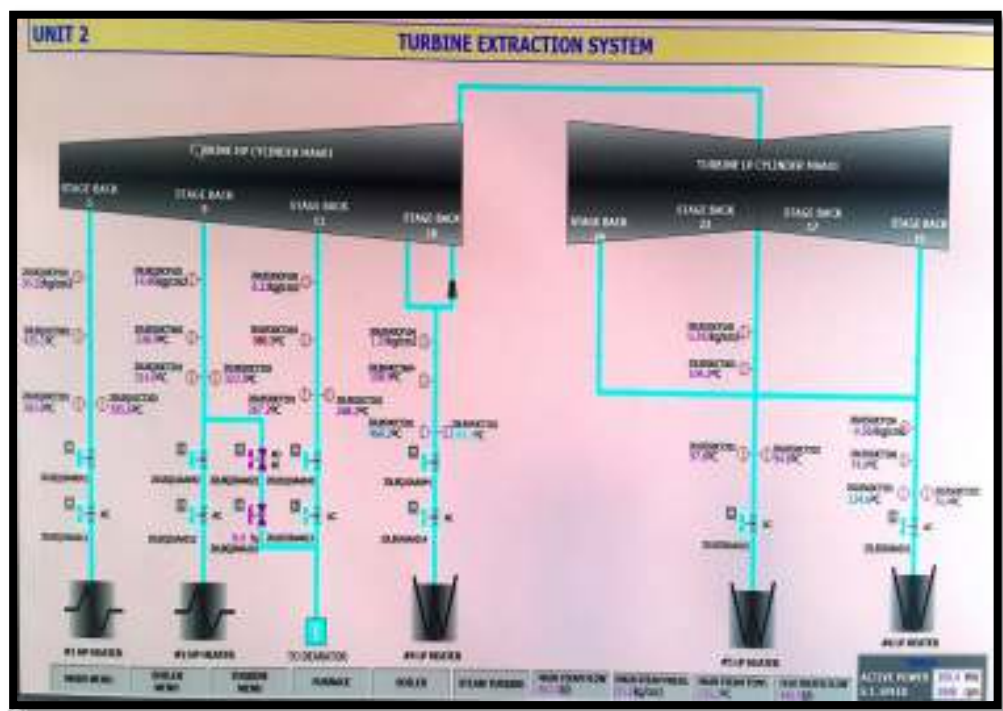
Gambar : Deaerator System



Lampiran 4. Condensate Water System dan Turbine Extraction System

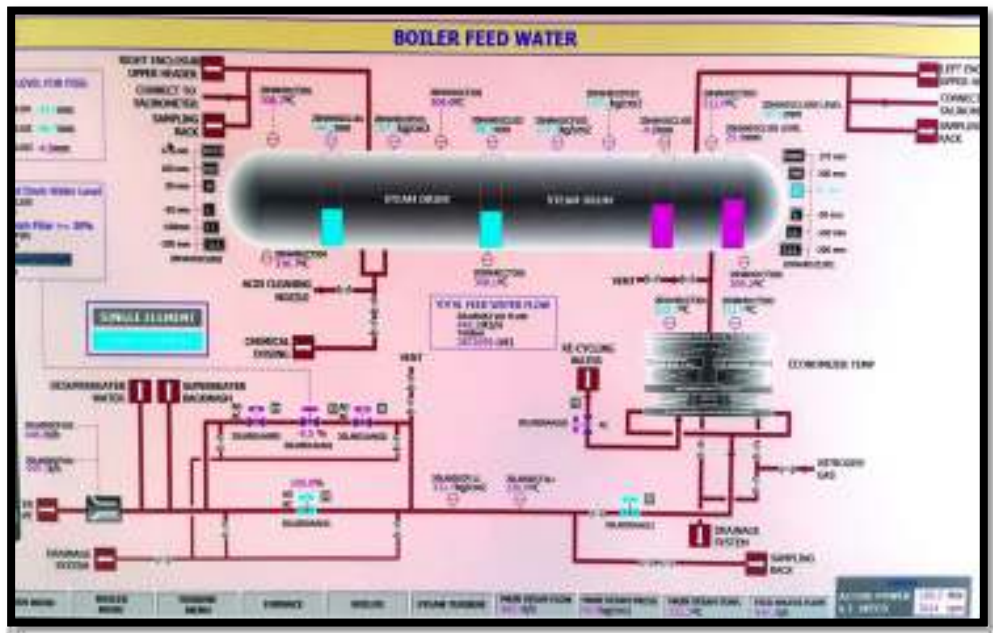


Gambar : Condensate Water System

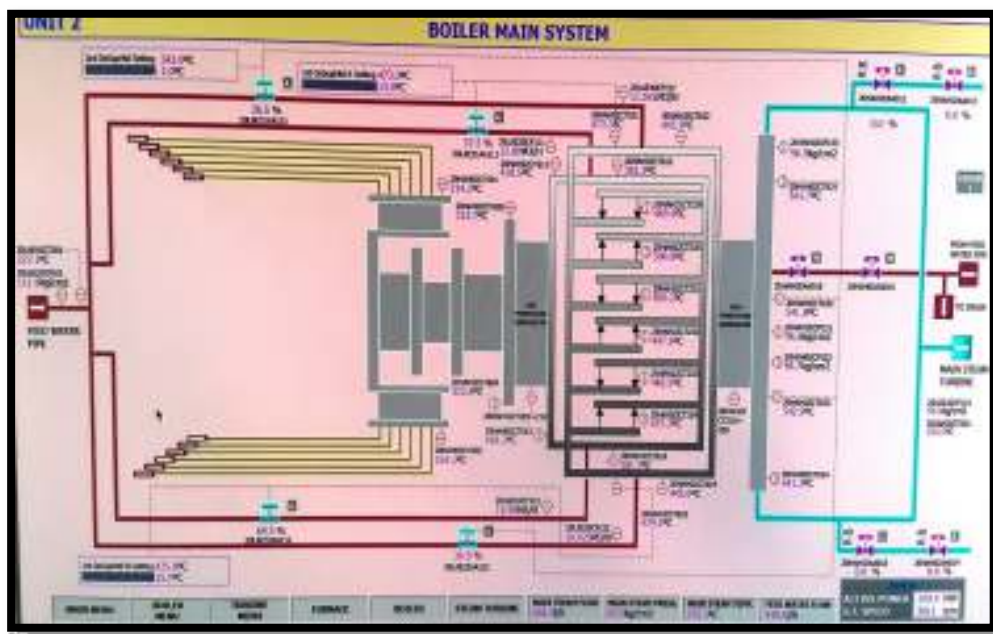


Gambar : Turbine Extraction System

Lampiran 5. Boiler Drum dan Desuperheater

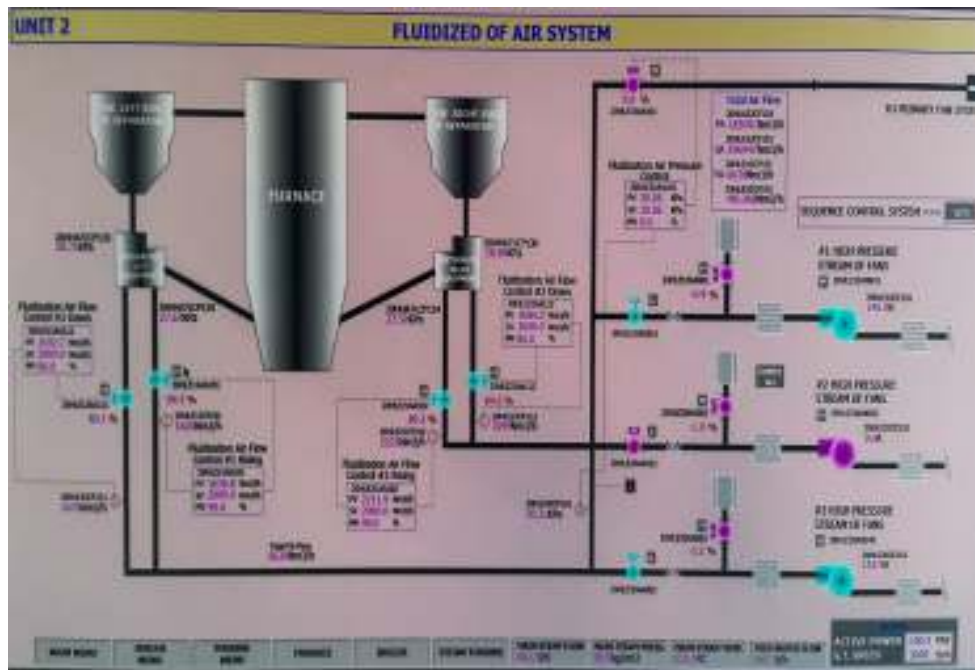


Gambar : Boiler Drum

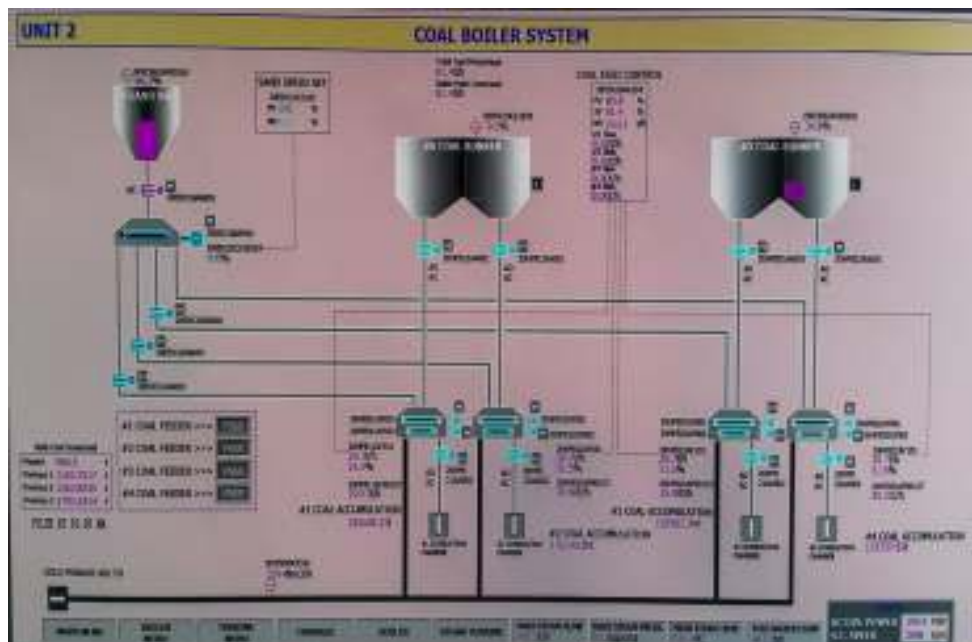


Gambar : Desuperheater

Lampiran 5. Fluidized Air Blower dan Coal Feeder



Gambar : Fluidized Air Blower



Gambar : Coal Feeder