



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**ANALISIS PEFORMA PLTU VERSUS VARIASI BEBAN  
PADA TURBIN UAP MENGGUNAKAN *SOFTWARE  
CYCLE TEMPO***

**SEKAR SATITI  
NRP 2111 100 044**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**FINAL PROJECT – TM 141585**

**Analysis of Plant Performance Versus Variation of Load  
on Steam Turbine Using Cycle Tempo**

**SEKAR SATITI  
NRP 2111 100 044**

**Supervisor  
Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME**

**Mechanical Engineering Departement  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015**

***Analisis Peforma PLTU versus Variasi Beban pada Turbin Uap menggunakan Software Cycle Tempo***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada**

**Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Sekar Satiti  
NRP. 2111 100 044**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME ..... (Pembimbing)  
(NIP. 195312191981031001)
2. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng ..... (Penguji I)  
(NIP. 195310191979031002)
3. Ary Bachtiar K.P, ST, MT, Ph.D ..... (Penguji II)  
(NIP. 197105241997021001)
4. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT ..... (Penguji III)  
(NIP. 197104051997021001)

**SURABAYA  
Januari, 2016**

## **Analisis Peforma PLTU versus Variasi Beban pada Turbin Uap menggunakan *Software Cycle Tempo***

**Nama** : Sekar Satiti

**NRP** : 2111100044

**Jurusan** : Teknik Mesin-FTI ITS

**Dosen Pembimbing:** Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME.

### **Abstrak**

*Penggunaan listrik merupakan kebutuhan utama. Di Indonesia, pembangkit listrik umumnya menggunakan tenaga uap. Pembangkit listrik tenaga uap merupakan suatu pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (boiler). Salah satu komponen penting dalam PLTU adalah turbin uap. Turbin digunakan untuk memutar generator dengan cara mengubah energi termal yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik. Salah satu produsen listrik yang akan diteliti yaitu berada di Tanjung Balai Karimun. PLTU dengan kapasitas 7630 kW dalam nett output dan 9032 kW dalam gross output.*

*Langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini, diawali dengan pengambilan data PLTU. Analisis termal pada sistem pembangkit di Tanjung Balai dalam keadaan normal. Membuat pemodelan PLTU menggunakan software cycle tempo berdasarkan process flow diagram (PFD). Pemodelan dilakukan mulai dari kondisi eksisting dan variasi pembebanan pada turbin uap dalam cycle tempo sebesar 50%; 75% ;100% dan 110% sehingga didapatkan data heat mass balance dan nett efisiensi.*

*Penelitian analisis performa PLTU versus variasi beban pada turbin uap mendapatkan hasil pengaruh pembebanan turbin*

*uap terhadap nilai heat rate dan konsumsi bahan bakar. Validasi hasil pemodelan cycle tempo dan lapangan sebesar 0.0018 dari angka mass flow rate. Perbedaan beban pada turbin didapatkan kenaikan konsumsi batubara pada PLTU sebesar 3.35 kg/s; 4.75 kg/s; 5.77 kg/s dan 6.49 kg/s dalam perhitungan termodinamika. Kenaikkan konsumsi batubara menggunakan perhitungan dengan cycle tempo sebesar 3.99 kg/s; 5.98 kg/s; 7.98 kg/s dan 8.77 kg/s. Nilai nett heat rate dari PLTU didapatkan nilai yang menurun. Nilai nett heat rate dalam perhitungan termodinamika sebesar 48083.55 kJ/kW-h; 45513.98 kJ/kW-h; 41445.79 kJ/kW-h dan 40893.18 kJ/kW-h. Nilai nett heat rate dalam perhitungan menggunakan cycle tempo, yaitu 57357.18 kJ/kW-h; 57334.56 kJ/kW-h; 57324.45 kJ/kW-h dan 57315.67 kJ/kW-h. Nilai gross heat rate dari PLTU didapatkan nilai yang terus menurun. Nilai gross heat rate dalam perhitungan termodinamika sebesar 40619.74 kJ/kW-h; 38449.03 kJ/kW-h; 35012.33 kJ/kW-h dan 34406.16 kJ/kW-h. Nilai gross heat rate yang didapat dari perhitungan dalam cycle tempo sebesar 48453.86 kJ/kW-h; 48434.75 kJ/kW-h; 48426.21 kJ/kW-h dan 48419.28 kJ/kW-h.*

***Kata kunci : Variasi Beban pada Turbin Uap, Performa Pembangkit, Software Cycle - Tempo***

## ***Analysis of Plant Performance Versus Variation of Load on Steam Turbine Using Cycle Tempo***

***Name*** : ***Sekar Satiti***

***NRP*** : ***2111100044***

***Department*** : ***Teknik Mesin FTI - ITS***

***Advisor Lecturer*** : ***Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME***

*Using of electricity is the main requirement. In Indonesia, power plants generally use steam. Steam power plant is a power plant where the electrical energy generated by generator that is turned by a steam turbine that utilize the result of evaporation, vapor pressure that is heated by the fuel in the combustion chamber. One of important component in plant is steam turbine. Steam turbine on power plant is used to turn a generator by changing the thermal energy contained in the steam into mechanical energy. One of produce electricity that will be studied are located in Tanjung Balai Karimun. Power plant with a capacity of 7630 kW in nett output and 9032 kW in gross output.*

*Steps are used in this study is starting with data collection PLTU. Analysis thermal of power plant in Tanjung Balai in normal circumstances. Creating model of power plant using cycle tempo based on process flow diagram (PFD). Modeling start from existing conditions and variations of load on the steam turbine on cycle tempo by 50 75, 100 and 110, so that the data obtained heat mass balance and nett efficiency.*

*Research from analysis of PLTU performance versus steam turbine load variations of load on steam turbine get the loading effect on steam turbine with the value of heat rate and fuel consumption. Validation from cycle tempo and process flow diagram is 0.0018 from number mass flow rate. Differences in load on the turbine is obtained an increase in coal consumption*

*in the power plant as 3.35 kg / s 4.75 kg / s 5.77 kg / s and 6:49 kg / s in the thermodynamic calculations. An increase in coal consumption using calculations by the cycle tempo as 3.99 kg / s 5.98 kg / s 7.98 kg / s and 8.77 kg / s. Nett plant heat rate obtained value decreases. Nett value in the calculation of the thermodynamic heat rate as 48083.55 kJ / kW-h 45513.98 kJ / kW-h 41445.79 kJ / kW-h and 40893.18 kJ / kW-h. Nett heat rate value in the calculation using the cycle tempo as 7357.18 kJ / kW-h 57334.56 kJ / kW-h 57324.45 kJ / kW-h and 57315.67 kJ / kW-h. Gross plant heat rate obtained values continue to decline. The value of gross heat rate in thermodynamic calculations as 40619.74 kJ / kW-h 38449.03 kJ / kW-h 35012.33 kJ / kW-h and 34406.16 kJ / kW-h. The value of gross heat rate obtained from the calculation of the cycle time is 48453.86 kJ / kW-h 48434.75 kJ / kW-h 48426.21 kJ / kW-h and 48419.28 kJ / kW-h.*

***Keywords: variation of load on steam turbine, plant performance, Software of Cycle - Tempo***

## KATA PENGANTAR

### **Assalamualaikum Wr.Wb.**

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, Tuhan Maha Pengasih Maha Penyayang, karena atas segala nikmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat dan salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW yang membawa cahaya keimanan dan agama Islam sebagai pedoman kehidupan untuk selalu bertaqwa dan beriman kepada Allah SWT.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada halaman ini, penulis ingin memberi hormat dan ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu tercinta, Sri Retno Tartiningrum yang selalu mendukung, memberikan kasih sayang, dan tak henti-hentinya mendoakan penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini. Terima kasih ibunda atas segalanya
2. Ayah tercinta, Irawan yang selalu mendukung, menasehati, mengarahkan, dan mendoakan penulis. Terima kasih ayah untuk semuanya
3. Adik adik tercinta, Amania dan Damar selalu mendukung, dan mendoakan penulis.
4. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ide, pembelajaran dan pengetahuan yang tidak ternilai harganya bagi penulis untuk memberikan hasil yang bermanfaat
5. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M. Eng., Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, Ary Bachtiar K. P, ST, MT, PhD. sebagai dosen penguji tugas akhir sekaligus reviewer pomits yang telah memberikan kritik dan saran terhadap penulis dan memberikan pembelajaran kepada penulis
6. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, sebagai dosen wali penulis, terima kasih untuk saran-saran serta bimbingannya dalam merencanakan perkuliahan penulis selama ini.

7. Segenap dosen Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran serta pengalaman dalam mendidik penulis dalam bidang keteknikan maupun ilmu tentang kehidupan selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin ITS
8. Seluruh keluarga besar penulis yang tak henti mendukung, menyemangati, dan mendoakan penulis selama perkuliahan
9. Seluruh keluarga M54 yang telah menemani penulis dari POROS hingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan. Untukmu angkatanku sahabat sejawatku
10. Nazilah, Mbak Dian, Bobby, Nia, Mbak Hayu, Mas Rizki, Mas Ari, Mbeng, Fuad, Rony, Raymond partner tugas akhir yang telah berjuang bersama-sama dibawah bimbingan Bp. Budi, terima kasih untuk perjuangan bersama penulis
11. Keluarga Lab.Perpindahan Panas yang selalu membantu dan menghibur penulis selama mengerjakan tugas akhir di lab. Semoga kesuksesan selalu menyertai kita
12. Teman-teman Fab, Zieda, Indah, Scania, Stevany, Aulia, Dewi dan Anita, terima kasih untuk selalu mengingatkan penulis ketika berbuat kesalahan dan selalu membantu penulis dalam mengemban amanah yang pernah diberikan
13. Seluruh pihak civitas akademika Teknik Mesin FTI ITS dan Sarekat Merah Rakyat Mesin

Penulis berharap agar tugas akhir ini bermanfaat untuk pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan ke depannya.

Wassalamualaikum Wr.Wb

Surabaya, 29 Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

TITLE PAGE

HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK

ABSTRACT

KATA PENGANTAR..... i

DAFTAR ISI.....iii

DAFTAR GAMBAR..... vii

DAFTAR TABEL..... iii

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....1

1.2 Rumusan Masalah.....4

1.3 Batasan Masalah.....4

1.4 Tujuan Penelitian.....4

1.5 Manfaat Penelitian.....3

### BAB II DASAR TEORI

2.1 Siklus Rankine.....7

2.2 Siklus Rankine Regeneratif.....8

2.2.1 Analisis *Open Feedwater Heater*.....9

2.2.2 Analisis *Closed Feedwater Heater*.....15

2.2.3 Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar.....16

2.2.4	Perhitungan <i>Heat Rate</i> .....	17
2.3	Software Cycle Tempo.....	18
2.4	Penelitian Terdahulu.....	19

### BAB III KESIMPULAN

3.1	Sistematika Penelitian.....	23
3.2	Studi Literatur PLTU Tanjung Balai Karimun.....	24
3.3	Pemodelan PLTU Tanjung Balai Karimun menggunakan <i>Cycle Tempo</i> .....	26
3.4	Diagram Perhitungan.....	28
3.5	Bagan Alur Perhitungan Termodinamika.....	31

### BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	Data dan Model PLTU Tanjung Balai Karimun....	33
4.2	Membangun Permodelan Awal Berdasarkan PFD Pembangkit Listrik Tenaga Uap.....	36
4.3	Perbandingan data <i>Heat Balance</i> pada PFD dengan hasil <i>cycle Tempo</i> .....	39
4.4	Contoh Perhitungan.....	40
4.5	Analisis PLTU Tanjung Balai Karimun setelah Dilakukan Variasi Beban pada Turbin Uap.....	50
4.5.1	Analisis Konsumsi Batubara yang Digunakan Versus Variasi Beban pada Turbin uap.....	50
4.5.2	Analisis Nett Plant Heat Rate Versus Variasi Beban Pada Turbin Uap.....	53

4.5.3 Analisis Gross Plant Heat Rate Versus Variasi Beban pada Turbin Uap.....	54
4.5.4 Analisis Konsumsi Batubara Versus Variasi efisiensi pada Turbin uap dalam perhitungan <i>cycle tempo</i> ....	56

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60

DAFTAR PUSTAKA.....	61
---------------------	----

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 PLTU Tanjung Balai Karimun.....	2
Gambar 2.1 Skema dan T-s Diagram Siklus <i>Rankine</i> .....	7
Gambar 2.2 <i>Open feedwater heater</i> .....	9
Gambar 2.3 <i>Closed feedwater heater</i> .....	16
Gambar 2.4 Contoh pekerjaan <i>cycle tempo</i> .....	18
Gambar 2.5 Skema Gambar PLTU Al-Hartha 200MW.....	19
Gambar 2.6 (a) Nilai terbaik dari tekanan ekstraksi dari turbin HP (b) Skema sistem pembangkit.....	20
Gambar 3.1 Diagram alir langkah penelitian.....	24
Gambar 3.2 Proses Flow diagram dari PLTU Tanjung Balai Karimun.....	25
Gambar 3.3 Pemodelan PLTU Tanjung Balai Karimun.....	26
Gambar 3.4 T-S Diagram model PLTU Balai Tanjung Karimun.....	27
Gambar 4.1 Skema Aliran Steam berdasarkan PLTU Tanjung Balai Karimun .....	35
Gambar 4.2 Pemodelan pada Cycle tempo berdasarkan komponen PLTU Balai Karimun.....	36
Gambar 4.3 Sistem Matriks Pemodelan PLTU Balai Karimun...37	
Gambar 4.4 Hasil Pemodelan PLTU Tanjung Balai pada Cycle Tempo.....	38

Gambar 4.5 T-S diagram Tanjung Balai Karimun.....	41
Gambar 4.6 Grafik Konsumsi Batubara Versus Variasi Beban pada Turbin.....	50
Gambar 4.7 Grafik Nett Plant Heat Rate Versus Variasi Beban pada Turbin.....	53
Gambar 4.8 Gross Plant Heat Rate Versus Variasi Beban pada Turbin.....	54
Gambar 4.9 Grafik Konsumsi Batubara versus Variasi Efisiensi Turbin.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan Biaya Bahan Bakar Terhadap Produksi Tenaga Listrik 2005.....	3
Tabel 3.1 Data <i>Turbine Maximum Continuos Rating</i> .....	26
Tabel 4.1 Data <i>Heat Balance</i> .....	34
Tabel 4.2 Perbandingan data heat balance.....	39
Tabel 4.3 Data Hasil setelah Dilakukan Variasi Pembebanan....	49
Tabel 4.4 Data Mass Flow Rate.....	51
Tabel 4.5 Data Efisiensi.....	51
Tabel 4.6 Data variasi efisiensi turbin terhadap <i>mass flow rate</i> .....	57
Tabel 4.7 Data variasi efisiensi turbin terhadap efisiensi pembangkit.....	57

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari penggunaan listrik menjadi kebutuhan utama. Di Indonesia, pusat pembangkit listrik umumnya menggunakan tenaga uap. Pembangkit listrik tenaga uap ini merupakan pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (*boiler*). Salah satu komponen penting dalam PLTU adalah turbin uap. Turbin digunakan untuk memutar generator dengan cara mengubah energi termal yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik. Uap dengan tekanan dan temperatur tinggi diarahkan untuk mendorong sudu-sudu turbin yang dipasang pada poros sehingga turbin berputar. Akibat melakukan kerja di turbin tekanan dan temperatur uap menjadi turun sehingga menjadi uap basah yang kemudian dialirkan ke kondensor. Jumlah uap yang masuk ke dalam turbin merupakan beban yang diterima oleh turbin sehingga perlu diperhatikan dalam suatu sistem pembangkit.



Gambar 1.1 PLTU Tanjung Balai Karimun

Salah satu produsen listrik di Indonesia berada di Tanjung Balai Karimun. Kota Tanjung Balai Karimun adalah ibukota kabupaten Karimun di provinsi Kepulauan Riau. Di daerah Tanjung Balai Karimun terdapat banyak sistem pembangkit yang menggunakan tenaga diesel. Keutamaan PLTD dapat dilihat dari pemakaiannya yang dapat berlangsung terus menerus selama bahan bakarnya masih tersedia, keandalan PLTD juga cukup tinggi karena tidak berpengaruh oleh alam. PLTD dapat dibangun dimana saja (pantai sampai pegunungan) dengan kapasitas yang dapat disesuaikan, bahkan di desa terpencil dengan sedikit pengguna. Perlu diketahui bahwa harga bahan bakar diesel ini lebih mahal dibandingkan bahan bakar batubara .

Tabel 1.1 Perbandingan Biaya Bahan Bakar Terhadap Produksi Tenaga Listrik 2005

Jenis Energi	Rp. Milyar		Produksi GWh	
<b>Minyak</b>	<b>14,504</b>	<b>63.2%</b>	<b>31,184.4</b>	<b>33.2%</b>
<b>Gas</b>	<b>3,771</b>	<b>16.4%</b>	<b>19,899.5</b>	<b>21.2%</b>
<b>Batubara</b>	<b>3,576</b>	<b>15.6%</b>	<b>30,700.4</b>	<b>32.6%</b>
<b>Panas bumi</b>	<b>1,060</b>	<b>4.6%</b>	<b>3,084.8</b>	<b>3.3%</b>
<b>Air</b>	<b>45</b>	<b>0.2%</b>	<b>9,171.5</b>	<b>9.8%</b>
<b>Total</b>	<b>22,956</b>	<b>100.0%</b>	<b>94,040.6</b>	<b>100.0%</b>

Berdasarkan pertimbangan dari data pada tabel diatas, maka dibangun PLTU di daerah Tanjung Balai Karimun dengan *gross output* 9032 kW dan 7630 kW *nett output* oleh PT. DEN berbahan bakar batu bara karena bahan baku batu bara lebih mudah didapatkan di Indonesia dengan biaya yang lebih murah.

Suatu sistem pembangkit dikatakan baik ketika performansinya tinggi. Peformansi tinggi diartikan dengan energi yang masuk tidak banyak terbuang untuk menghasilkan suatu daya yang diinginkan. Salah satu komponen penting dalam pembangkit adalah turbin uap. Turbin uap ini dikopel dengan generator yang menghasilkan daya, ketika daya yang dihasilkan besar maka kerja turbin uap akan lebih besar dan sebaliknya.

Berdasarkan perubahan pembebanan pada turbin uap yang mengakibatkan perubahan peformansi pada pembangkit itu sendiri, peneliti melalui tugas akhir ini memilih untuk mengkaji dan menganalisis jumlah pembebanan pada turbin uap demi mengetahui pengaruh nilai *heat rate* dari pembangkit dan juga pengaruh terhadap jumlah konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan pada PLTU Tanjung Balai Karimun.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas pada Tugas Akhir ini yaitu:

1. Bagaimana cara membuat analisis perhitungan manual sistem pembangkit dengan menggunakan pendekatan analisis termodinamika?
2. Bagaimana pengaruh pembebanan pada turbin uap terhadap nilai *heat rate* dari sistem pembangkit?
3. Bagaimana pengaruh pembebanan pada turbin uap terhadap konsumsi bahan bakar dari sistem pembangkit?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dan asumsi yang ada dalam penelitian ini yaitu:

1. Analisis berdasarkan data operasi PLTU Tanjung Balai Karimun 2X7 MW.
2. Kondisi operasi adalah tunak (*steady state*).
3. Rugi rugi panas pada instalasi pipa tidak diperhitungkan.
4. Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan.
5. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan analisis termodinamika dan perpindahan panas.
6. Fluida kerja yang digunakan adalah air.
7. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo*.
8. Daya turbin dibuat tetap pada pembebanan 100%.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah diatas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Dapat membuat analisis perhitungan manual sistem pembangkit dengan menggunakan pendekatan analisis termodinamika.
2. Mengetahui pengaruh pembebanan pada turbin uap terhadap *heat rate* sistem pembangkit dengan

menggunakan pemodelan sistem pembangkit di *cycle tempo*.

3. Mengetahui pengaruh pembebanan pada turbin uap terhadap kebutuhan bahan bakar sistem pembangkit dengan menggunakan pemodelan sistem pembangkit di *cycle tempo*.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diambil dari variasi beban pada turbin uap adalah sebagai berikut:

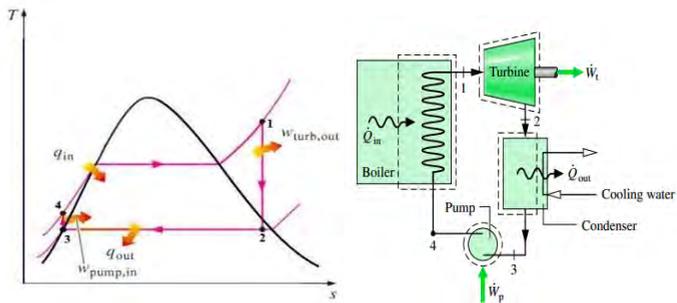
1. Dapat menjabarkan pengaruh pembebanan pada turbin uap terhadap *heat rate* dan konsumsi bahan bakar dari pembangkit dengan menggunakan *software Cycle Tempo*.
2. Dapat digunakan sebagai data pendamping dalam menentukan beban pada turbin uap.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Siklus Rankine

Siklus *Rankine* merupakan siklus teoritis paling sederhana yang menggunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana digunakan pada sebuah PLTU. Dikatakan siklus teoritis paling sederhana, karena merupakan modifikasi dari siklus *Carnot*, dimana proses pemanasan dan pendinginan pada siklus ini terjadi pada tekanan yang tetap. Pada siklus *Rankine*, komponen-komponen utama yang bekerja dapat dilihat seperti gambar 2.1 di bawah ini.



**Gambar 2.1 Skema dan T-s Diagram Siklus Rankine**

Gambar diatas adalah gambar dari siklus *Rankine*. Terdapat 4 proses prinsip kerja siklus *Rankine*, setiap siklus mengubah keadaan fluida (tekanan dan atau wujud). yaitu :

- proses 1 - 2 : Uap melakukan kerja sehingga tekanan dan temperaturnya turun. Langkah ini adalah langkah ekspansi isentropis, dan terjadi didalam turbin.
- proses 2 – 3 : Pembuangan panas laten uap sehingga berubah menjadi air kondensat. Langkah ini adalah isobar isothermis, dan terjadi didalam kondensor.

- proses 3 – 4 : Air dipompa dari tekanan P2 menjadi P1. Langkah ini adalah langkah kompresi isentropis, dan proses ini terjadi pada pompa air pengisi.
- proses 4 – 1 : Air bertekanan ini dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik cair jenuh kemudian air berubah wujud menjadi uap jenuh, setelah itu uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap panas lanjut.

Selain siklus *Rankine* ideal terdapat juga siklus uap lain yaitu siklus regeneratif. Siklus ini merupakan salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi termal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yaitu dengan cara meningkatkan temperatur rata-rata fluida yang akan masuk ke dalam boiler. Peningkatan temperatur ini dapat dilakukan dengan menggunakan suatu alat yang disebut dengan *feedwater heater*.

## 2.2 Siklus *Rankine* Regeneratif

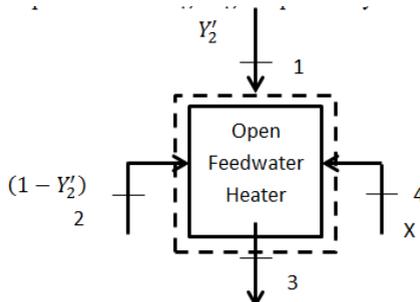
Siklus *Rankine* regeneratif adalah modifikasi siklus *Rankine* dimana air sebagai fluida kerja dinaikkan temperaturnya dengan memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin sehingga *kalor* yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida kerja pada boiler berkurang. Hal ini tentu saja akan menaikkan efisiensi siklus.

Regenerasi tidak hanya meningkatkan efisiensi siklus tetapi juga salah satu cara deaerasi. Deaerasi yaitu menghilangkan kadar oksigen dalam air yang bisa menyebabkan korosi pada jalur perpipaan. Proses regenerasi umumnya dengan menggunakan alat yang biasanya disebut feed water heater dengan prinsip kerja seperti heat exchanger. Feed water heater ada 2 jenis yaitu tipe terbuka dan tertutup. *Open feed water heater* atau bisa disebut juga pemanas kontak langsung secara prinsip adalah sebuah ruangan pencampur antara uap ekstraksi dengan fluida kerja (air). Tipe selanjutnya adalah *Close Feedwater Heater* atau biasa disebut pemanas sistem tertutup. Prinsip kerjanya adalah panas

dari uap ekstraksi dipindahkan ke air pengisi namun tanpa terjadi kontak langsung

### 2.2.1 Analisis *Open Feedwater Heater*

Pada *heat exchanger* jenis ini aliran fluida yang berbeda temperatur akan bercampur secara langsung tanpa adanya penyekat.



**Gambar 2.2** *Open feedwater heater*

Fraksi  $y$  dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip konservasi massa dan konservasi energi pada volume atur di sekeliling pemanas air-pengisian. Jika tidak terjadi perpindahan kalor antara pemanas air-pengisian dan lingkungan sekitarnya serta efek energi kinetik dan potensial diabaikan, kesetimbangan laju massa dan energi pada kondisi *steady* akan menghasilkan persamaan sebagai berikut :

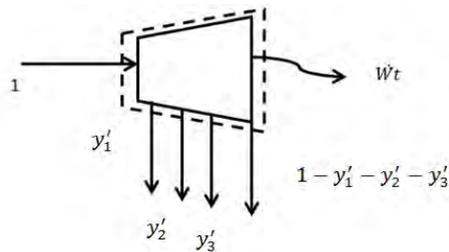
$$0 = Y'_2 h_1 + x h_4 + (1 - Y'_2)h_2 - h_3 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$0 = Y'_2 \dot{m}_1 + x \dot{m}_4 + (1 - Y'_2) \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \dots\dots\dots(2.2)$$

Persamaan untuk kerja utama dan perpindahan kalor dari siklus regeneratif dapat ditentukan dengan menerapkan kesetimbangan laju massa dan energi pada volume atur yang melingkupi setiap komponen.

## Analisis Turbin Uap

Turbin uap adalah alat yang mengekstraksi uap air yang bertekanan menjadi kerja. Cara kerja pada turbin uap ini yaitu fluida kerja berupa uap yang mempunyai massa dan tekanan dinaikkan temperaturnya dalam boiler sehingga berubah fase uap panas lanjut (*superheat*) dan memiliki energi yang besar. Energi dalam uap panas lanjut ini diekspansikan secara adiabatik (isentropik) sehingga menjadi kerja. Setelah diekspansikan oleh turbin, tekanan dan temperatur uap akan mengalami penurunan karena energinya digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. Dengan analisa hukum thermodinamika pertama persamaan energi pada turbin adalah :



$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + g z_e \right)$$

- Asumsi :
1. *Steady state*
  2.  $\Delta EK$  diabaikan
  3.  $\Delta EP$  diabaikan
  4.  $Q_{cv} = 0$

Maka :

➤ *Balance massa*

$$\frac{dM_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_1 - \sum \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_1 = Y'_1 \cdot \dot{m}_1 + Y'_2 \cdot \dot{m}_1 + Y'_3 \cdot \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\dot{m} = Y'_1 \cdot \dot{m}_1 + Y'_2 \cdot \dot{m}_1 + Y'_3 \cdot \dot{m}_1 + (1 - Y'_1 - Y'_2 - Y'_3) \dot{m}_1 \dots\dots\dots(2.4)$$

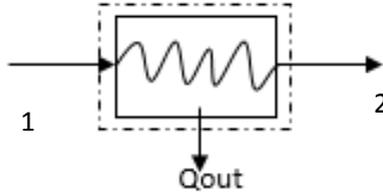
➤ *Balance Energy*

Uap dari *boiler* pada kondisi 1 yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondenser pada kondisi 2 dengan tekanan yang relatif rendah. Dengan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume atur di sekitar turbin pada kondisi tunak menjadi

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - (1 - Y'_1 - Y'_2 - Y'_3)h_2 - Y'_1 \cdot h_5 - Y'_2 \cdot h_4 - Y'_3 \cdot h_3 \dots\dots(2.5)$$

### **Analisis Kondenser**

Kondensor merupakan alat penukar panas yang berfungsi mengkondensasi fluida kerja. Agar tidak mengurangi efisiensi suatu pembangkit turbin uap, sejumlah uap yang telah digunakan untuk menggerakkan turbin harus dikembalikan dalam fasa cair yang disebut kondensat. Uap yang keluar dari turbin tekanan rendah terkondensasi menjadi air yang mengeluarkan panas laten dari uap. Sebagai akibat dari kehilangan panas, uap hasil ekstraksi dari turbin mula-mula didinginkan menjadi uap jenuh atau campuran, kemudian mengembun berubah menjadi cair. Dengan analisa hukum thermodynamika pertama persamaan energi pada kondenser adalah :



$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{out} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} + g z_i \right) - \dot{m} \left( h_o + \frac{v_o^2}{2} + g z_o \right)$$

- Asumsi :
1. *Steady state*
  2.  $\Delta EK$  diabaikan
  3.  $\Delta EP$  diabaikan
  4.  $\dot{W}_{cv} \approx 0$

Maka :

➤ *Balance massa*

$$\frac{dM_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_1 - \sum \dot{m}_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \dots\dots\dots(2.7)$$

➤ *Balance energy*

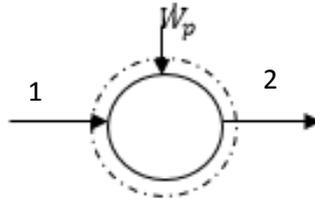
$$\frac{\dot{Q}_{condensor}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(2.8)$$

$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}$  merupakan laju perpindahan energi dari fluida kerja ke air pendingin per unit massa fluida kerja yang melalui kondenser. Perpindahan energi ini bernilai positif ke arah luar sistem.

**Analisis Pompa**

Pompa adalah suatu alat atau mesin yang digunakan untuk memindahkan cairan dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui suatu media perpipaan dengan cara menambahkan energi pada cairan yang dipindahkan dan berlangsung secara terus menerus. Pompa beroperasi dengan prinsip membuat

perbedaan tekanan antara bagian masuk (*suction*) dengan bagian keluar (*discharge*). Dengan kata lain, pompa berfungsi mengubah tenaga mekanis dari suatu sumber tenaga (penggerak) menjadi tenaga kinetis (kecepatan), dimana tenaga ini berguna untuk mengalirkan cairan dan mengatasi hambatan yang ada sepanjang pengaliran.



$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_p + \dot{m} \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} + g z_i \right) - \dot{m} \left( h_o + \frac{v_o^2}{2} + g z_o \right)$$

- Asumsi :
1. *Steady state*
  2.  $\Delta E_K$  diabaikan
  3.  $\Delta EP$  diabaikan
  4. pompa diisolasi

Maka :

➤ *Balance massa*

$$\frac{dM_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_1 - \sum \dot{m}_2 \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \dots\dots\dots(2.10)$$

➤ *Balance energy*

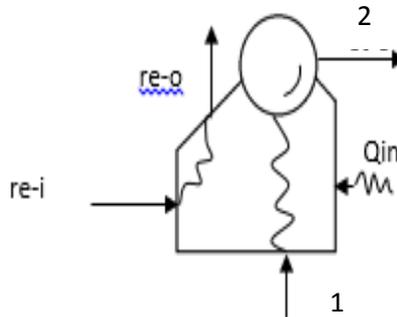
Pada siklus *Rankine* ini, kondensat cair yang meninggalkan kondensor dikondisi 1 dipompa dari kondensor ke dalam *boiler* yang bertekanan lebih

tinggi. Dengan menggunakan *volume* atur di sekitar pompa dan mengasumsikan tidak ada perpindahan kalor dengan sekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \dots\dots\dots(2.11)$$

### Analisis Boiler

Boiler adalah suatu alat yang digunakan untuk dapat menghasilkan uap bertekanan yang mempunyai temperatur tinggi, dimana fluida kerjanya adalah air. Pada siklus rankine ideal, fluida kerja menyelesaikan siklus ketika uap yang terkondensasi menjadi cair, dipompakan kemudian dipanaskan sampai keadaan jenuh dan diuapkan di dalam boiler. Uap panas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai penggerak turbin untuk membangkitkan tenaga listrik. Dengan analisis hukum pertama termodinamika persamaan energi pada boiler adalah :



$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum \dot{m}_o \left( h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right)$$

- Asumsi :
1. *Steady state*
  2.  $\Delta EK$  diabaikan
  3.  $\Delta EP$  diabaikan
  4.  $\dot{W}_{cv} = 0$

Maka :

➤ *Balance massa*

$$\frac{dM_{cv}}{\partial t} = \sum \dot{m}_1 - \sum \dot{m}_2 \quad 0(1) \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\dot{m}_{re-i} = \dot{m}_{re-o} = \dot{m}_{re} \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

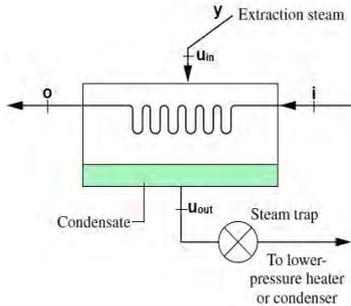
➤ *Balance energy*

Pada siklus PLTU Balai Karimun, *fluida* kerja menyelesaikan siklus ketika cairan yang meninggalkan *high pressure heater* pada kondisi 2 dipanaskan sampai jenuh dan diuapkan di dalam *boiler*. Dengan menggunakan *volume* atur yang melingkupi tabung *boiler* dan drum yang mengalirkan air pengisian dari kondisi 2 ke kondisi 1, kesetimbangan laju *massa* dan energi menghasilkan

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

### 2.2.2 Analisis *Closed Feedwater Heater*

*Closed feedwater heater* merupakan *heat exchanger* tipe *shell and tube*. Uap yang dicerat dari turbin akan dikondensasikan pada sisi *shell* sementara *feedwater* (air pengumpan) akan masuk melalui sisi *tube* dan menyerap panas dari uap sehingga akan meningkat temperatur.



**Gambar 2.3 Closed feedwater heater**

Fraksi dari aliran total yang diekstraksi  $y$  dapat dihitung dengan menerapkan prinsip-prinsip konservasi massa dan konservasi energi pada volume atur di sekeliling pemanas tertutup. Diasumsikan tidak terjadi perpindahan kalor antara pemanas air pengisian dengan lingkungan sekelilingnya dan mengabaikan efek energi kinetik dan potensial, kesetimbangan laju massa dan energi pada kondisi *steady state*, konservasi massa dan energi dapat disederhanakan menjadi

$$0 = y (h_{u_{in}} - h_{u_{out}}) + (h_i - h_o) \dots\dots\dots(2.16)$$

atau

$$y = \frac{h_o - h_i}{(h_{u_{in}} - h_{u_{out}})} \dots\dots\dots(2.17)$$

**2.2.3 Perhitungan Kebutuhan Batubara**

Melalui metode *balance energy* dapat dihitung masa bahan bakar yang dibutuhkan menggunakan energi yang dikeluarkan dan efisiensi kerja netto.

Efisiensi siklus *Rankine* mengukur seberapa banyak energi yang masuk ke dalam fluida kerja melalui boiler yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto dan gross. Efisiensi siklus *Rankine* dijelaskan dalam bentuk rumus sebagai berikut :

Efisiensi kerja netto

$$EF_{LHV} = \left( \frac{\text{Gross Generating output} - \text{auxiliary consumption}}{QrO} \right) \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan :

$EF_{LHV}$  = Efisiensi termal berdasarkan LHV atau Efisiensi kerja net (%)

$QrO$  = Energi yang keluar dari sistem (W)

Konsumsi Batubara yang dibutuhkan

$$QrF_{LHV} = 100x \left( \frac{QrO}{EF_{LHV}} \right), W \dots \dots \dots (2.19)$$

$$MrF = 100 \left( \frac{QrO}{EF_{LHV} \times LHVF} \right) = \frac{QrF_{LHV}}{LHVF}, \left( \frac{kg}{s} \right) \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan :

$MrF$  = Masa batubara

$QrF_{LHV}$  = Masukan dari bahan bakar berdasarkan LHV

## 2.2.4 Perhitungan Heat Rate

Laju kalor (*heat rate*) adalah jumlah energi yang ditambahkan melalui perpindahan kalor ke dalam siklus, biasanya dalam KJ, untuk menghasilkan satu unit keluaran kerja netto, biasanya dalam kW-h. Hal tersebut dapat diketahui dengan mengetahui terlebih dahulu masa batubara yang digunakan oleh pembangkit.

- $Nett\ plant\ heat\ rate = \frac{MrF \times LHVF}{Nett\ Generating\ Output} \dots \dots \dots (2.21)$

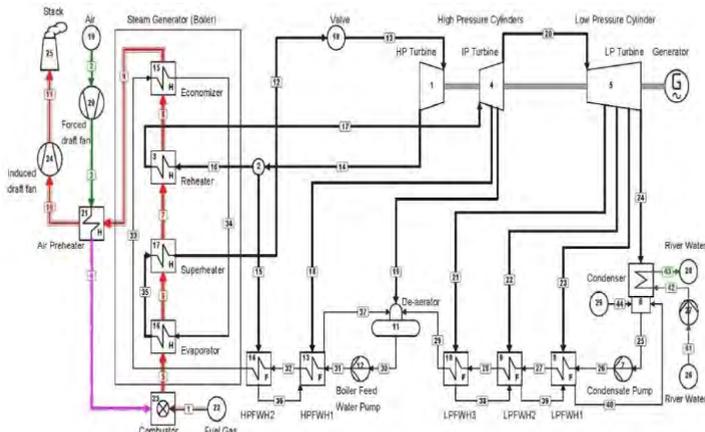


## 2.4 Penelitian Terdahulu

Pada sub bab ini akan dibahas penelitian penelitian terdahulu yang akan menjadi pertimbangan dalam analisa PLTU pada Tanjung Balai Karimun :

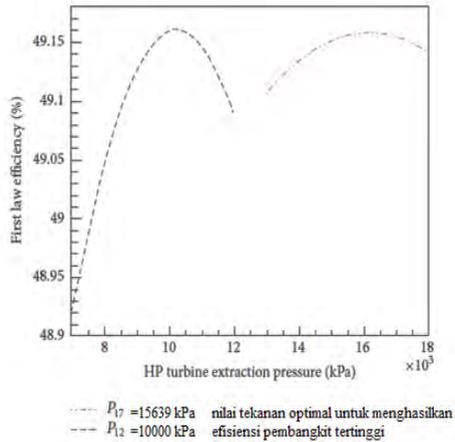
### 2.4.1 M S Jamel, A Abd Rahman and A H Shamsuddin

Dalam penelitian yang berjudul “*Simulation of Existing Gas-Fuelled Conventional Steam Power Plant Using Cycle Tempo*” berlokasi di Basra, Iraq dengan 200 MW. Pada penelitian ini menyimpulkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi termal dari pembangkit karena adanya temperatur udara yang masuk *furnance* meningkat sehingga kebutuhan akan proses *reheat* pada udara berkurang. Proses *reheat* disini bertujuan untuk menyimpan banyak uap dari hasil ekstraksi. Efisiensi net termal pada pembangkit akan lebih tinggi pada nilai minimal temperatur gas yang meninggalkan *stack* karena ketika temperatur gas yang keluar meninggalkan *stack* meningkat maka terdapat energi yang hilang. Menghindari banyaknya energi yang terbuang, gas yang keluar dari *stack* dicampur dengan udara bersih.

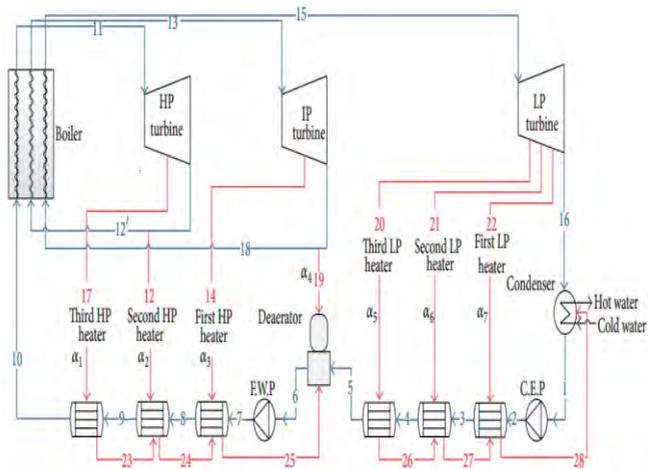


Gambar 2.5 Skema Gambar PLTU Al-Hartha 200M

## 2.4.2 M. M. Rashidi, A. Aghagoli, and M. Ali



**Gambar 2.6 (a)** Nilai terbaik dari tekanan ekstraksi dari turbin HP



**Gambar 2.6 (b)** Skema sistem pembangkit

M. M. Rashidi, A. Aghagoli, dan M. Ali dalam *“Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters”* menyimpulkan bahwa ketika tekanan pada HP turbin meningkat menyebabkan entalpi keluaran turbin menurun dan laju aliran massa menurun. Dari gambar 2.8 a terlihat bahwa daya turbin dan kalor boiler awalnya meningkat sampai maksimum dan kemudian menurun terhadap meningkatnya tekanan masukan HP turbin. Penurunan entalpi melewati turbin dan meningkatnya laju aliran massa ekstraksi karena tekanan masukan HP turbin yang meningkat mengakibatkan daya keluaran turbin meningkat. Perubahan gradient garis uap jenuh mengakibatkan daya turbin menurun dan hal tersebut menjelaskan perilaku dari efisiensi termal yang meningkat dan kemudian menurun seiring peningkatan tekanan ekstraksi turbin. Aliran massa dalam jumlah tertentu akan membuat ekstraksi dari turbin HP ke HPH naik nilai efisiensi pembangkitnya sampai optimal. Jumlah aliran massa juga akan mengurangi peforma dari turbin ketika terlalu banyak jumlah yang diekstraksi karena fungsi awal dari uap yang untuk memutar turbin tidak tercapai optimal.

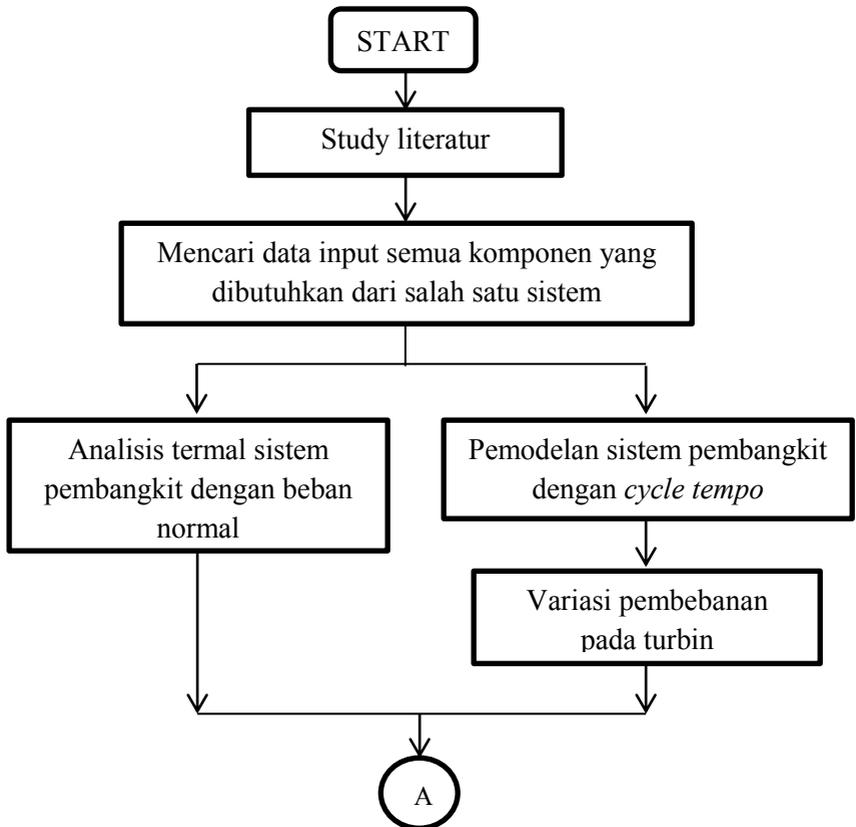
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

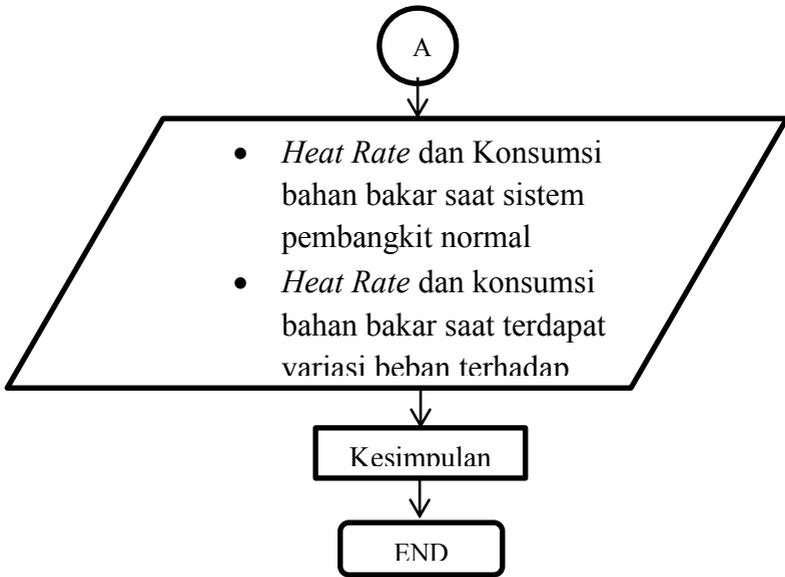
# BAB III

## METODOLOGI

### 3.1 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian digunakan untuk mengetahui gambaran umum tentang proses penelitian yang akan dilakukan. Berikut ini merupakan gambaran umum sistematika penelitian yang akan dilakukan.





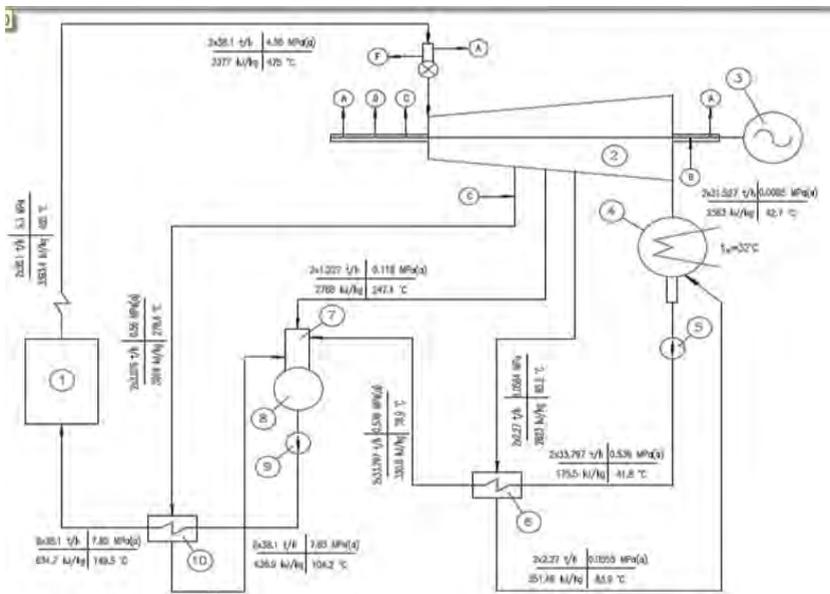
Gambar 3.1 Diagram alir langkah penelitian

### 3.2 Studi Literatur PLTU Tanjung Balai Karimun

Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit listrik tenaga uap di Tanjung Balai Karimun dengan *gross output* sebesar 9032 kW dan *nett output* sebesar 7630 kW, dimana model pembangkit ini menggunakan satu boiler, satu turbin uap yang dikopel dengan generator, kondensor, dan terdapat dua macam *feed water heater* yaitu dua *heater* serta satu deaerator. Turbin uap yang digunakan dalam model pembangkit ini adalah *low pressure turbine*. Pada turbin uap terjadi tiga ekstraksi. Ekstraksi pertama dan ketiga menuju *closed feed water* dan kedua menuju *open feed water*. *Closed feed water* berupa *High pressure feed water heater* dan *low pressure feed water heater*. *Open feed water* disini berupa deaerator. Pada siklus ini, fluida kerja mengalir

secara isentropik melalui turbin dan pompa, serta aliran yang melewati generator uap, kondenser, dan pemanas air pengisian terjadi tanpa adanya penurunan tekanan di setiap komponen tersebut.

Sistem PLTU ini akan dimodelkan pada *software cycle tempo*. Dasar pemodelan sistem PLTU pada *cycle tempo* adalah Proses Flow Diagram (PFD). Hal ini dilakukan agar pemodelan dapat disimulasikan sama dengan keadaan yang ada di lapangan. Berikut ini adalah Proses Flow Diagram (PFD) sebagai berikut :



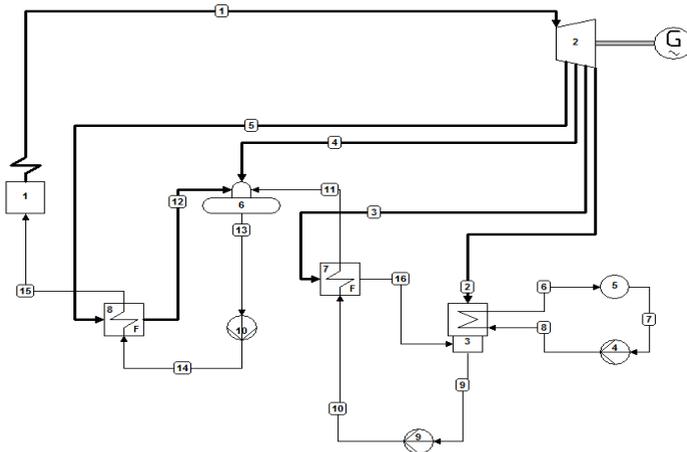
Gambar 3.2 Proses Flow diagram dari PLTU Tanjung Balai Karimun

Tabel 3.1 Data *Turbine Maximum Continuous Rating*

Kapasitas Uap	36450 kg/hr
Nilai Kalor Bawah	3624.62 kcal/kg
Nilai Kalor Atas	4000 kcal/kg
<i>Gross Heat Input</i>	$3.095 \times 10^7$ kcal/hr
<i>Nett Heat Input</i>	$2.820 \times 10^7$ kcal/hr
Tipe Batubara	<i>Low Rank Coals</i>

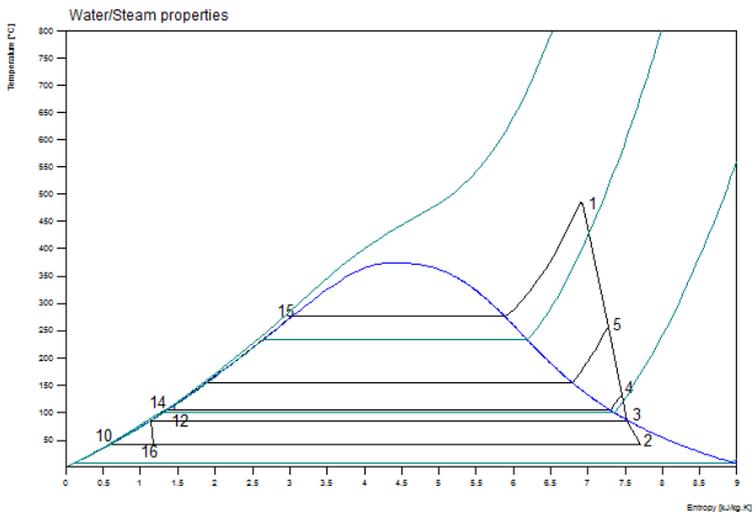
### 3.3 Pemodelan PLTU Tanjung Balai Karimun menggunakan *Cycle Tempo*

Pada Proses Flow Diagram di atas, properties, dimensi, dan flowrate yang diberikan berasal dari *balance of plant* yang terdapat pada PLTU Tanjung Balai Karimun. Pemodelan pada *Cycle Tempo* dapat dilakukan setelah PFD ada. Berikut merupakan gambar pemodelan pada *Cycle Tempo*.



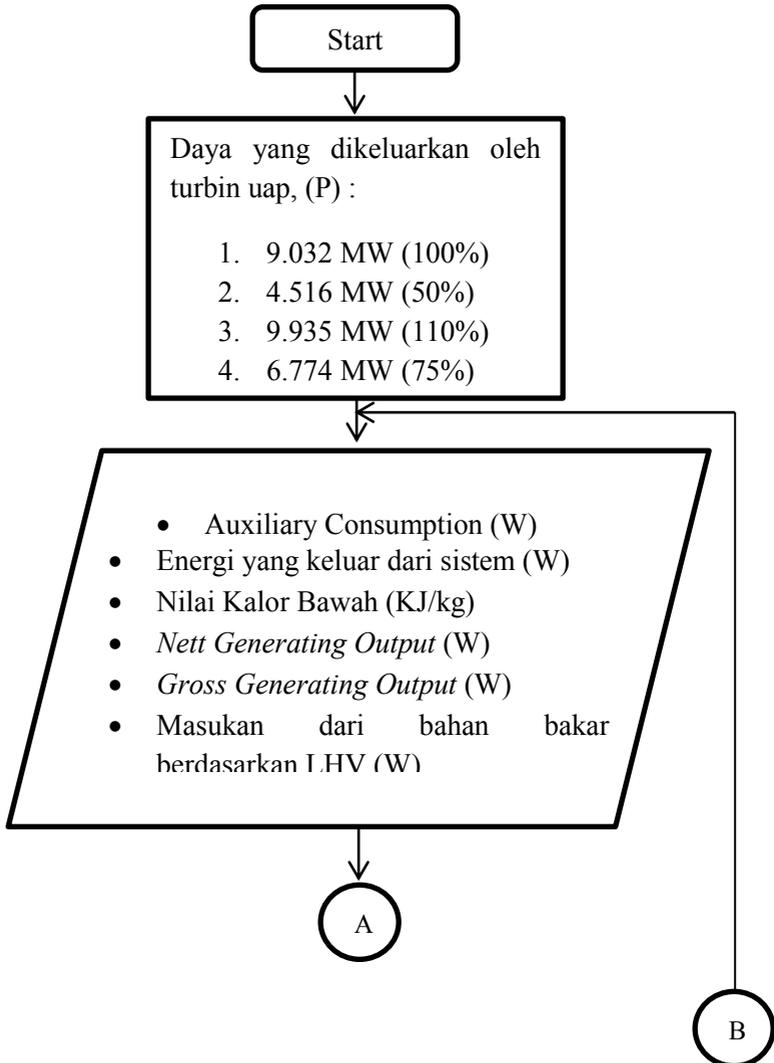
Gambar 3.3 Pemodelan PLTU Tanjung Balai Karimun

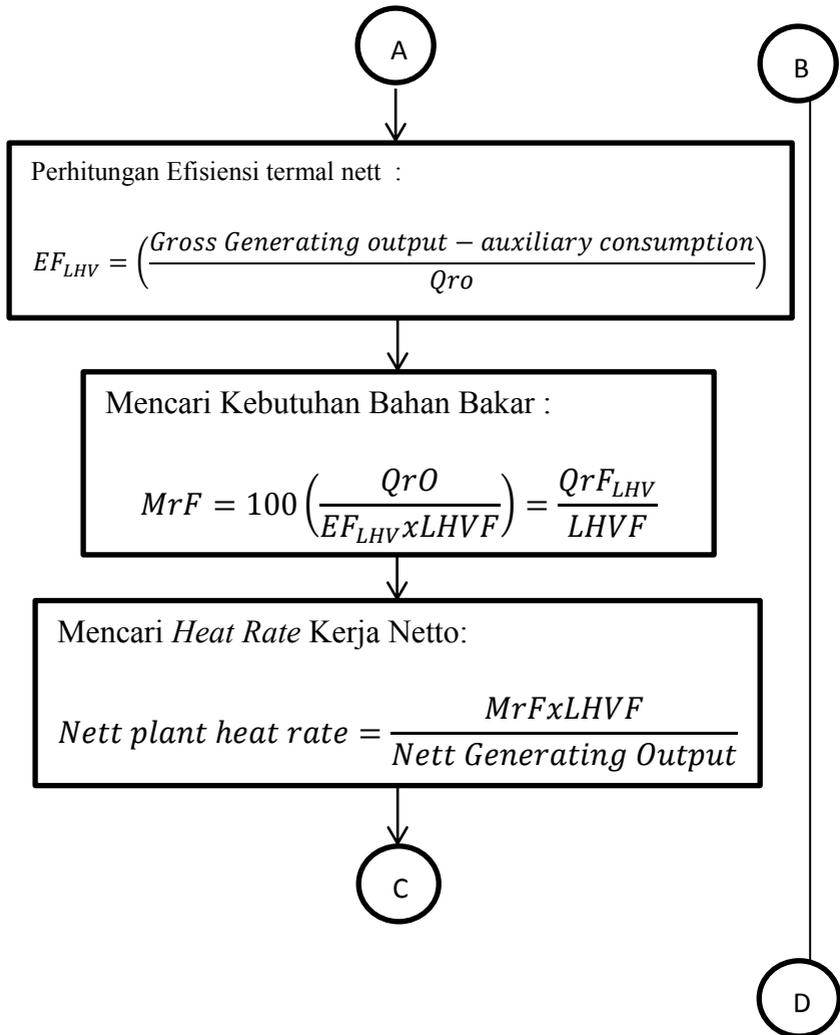
Dengan skema instalasi *process flow* diagram diatas didapatkan gambar 3.4 grafik T-S diagram kondisi eksisting tiap komponen tidak terjadi secara ideal karena peninjauan berdasarkan software *CycleTempo* . Komponen-komponen tersebut disimulasikan berkerja di dalam kondisi riil sehingga terdapat kehilangan atau losses. Selain itu, proses kompresi dan ekspansi tidak dapat secara ideal isentropik dan juga proses penambahan dan pelepasan panas tidak secara ideal isobar. Siklus pembangkit tenaga uap menggunakan fluida kerja dua fase berupa cairan dan uap air (*steam*).

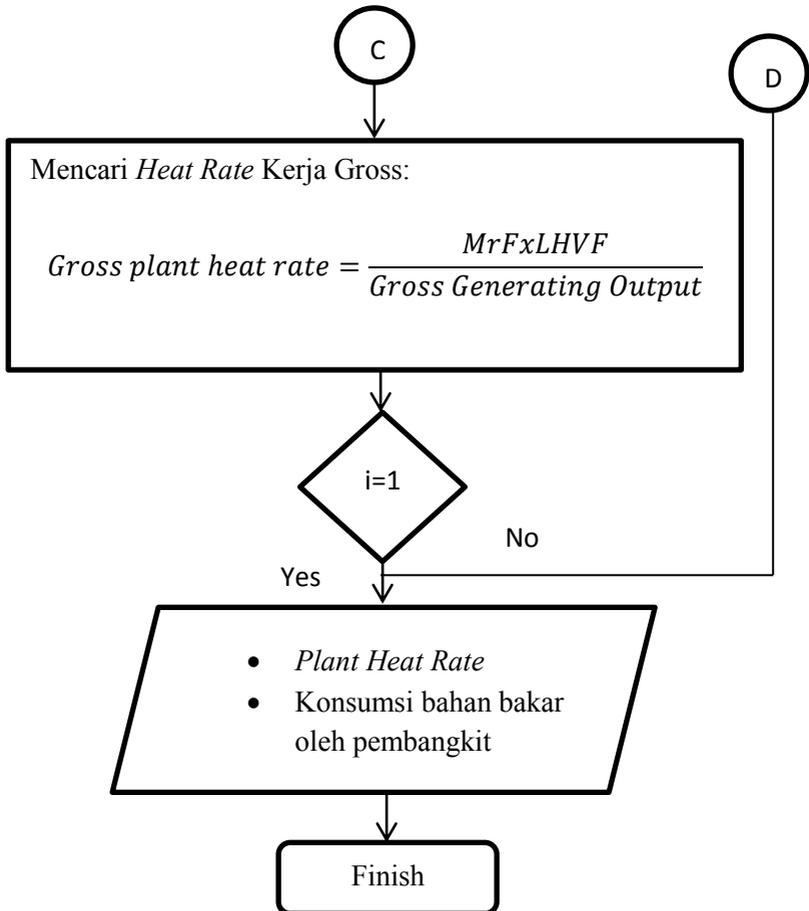


Gambar 3.4 T-S Diagram model PLTU Balai Tanjung Karimun

### 3.4 Diagram Perhitungan







### 3.5 Bagan Alur Perhitungan Termodinamika

Bagan alur dalam perhitungan termodinamika digunakan untuk mengetahui gambaran umum tentang proses perhitungan yang dilakukan. Berikut ini merupakan gambaran umum bagan alur perhitungan termodinamika yang akan dilakukan.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data dan Model PLTU Tanjung Balai Karimun

Langkah pertama dalam menganalisis sistem pembangkit memerlukan data awal sistem pembangkit tersebut. Pengambilan data awal dilakukan agar performa suatu sistem pembangkit dapat dihitung dan dianalisis. Berikut ini adalah data awal sistem pembangkit yang didapat dari lapangan.

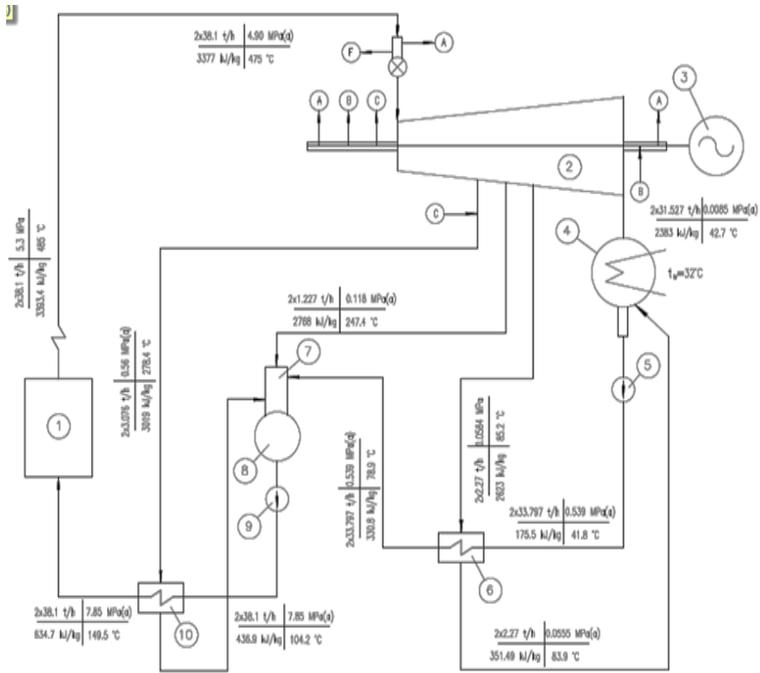
##### *Data Maximum Continuous Rating*

Kapasitas Uap	:	36450 kg/hr
<i>Gross Heat Input</i>	:	$3.095 \times 10^7$ kcal/hr
<i>Nett Heat Input</i>	:	$2.820 \times 10^7$ kcal/hr
Nilai Kalor Bawah	:	3624.62 kcal/kg
Nilai Kalor Atas	:	4000 kcal/kg
Tipe Batubara	:	<i>Low Rank Coals</i>

PLTU Tanjung Balai Karimun beroperasi dalam keadaan beban maximum untuk dianalisis. Data *heat balance* yang diambil melalui sistem akuisisi ditampilkan dalam tabel dan bagan PFD berikut ini.

Tabel 4.1 Data *Heat Balance*

No	Nama			PFD	No	Nama			PFD	
1	Boiler	Masuk	P (bar)	78.5	3	Kondensor	Masuk	P	0.085	
			T (celcius)	149.5				T	42.7	
			H (kJ/kg)	634.7				H	2383	
			M (kg/s)	10.58				M	8.75	
			Keluar	P	53	4	Low Pressure Heater	Masuk	P	5.39
			T	485				T	41.8	
			H	3393.4				H	175.5	
			M	10.58				M	9.38	
2	Turbin	Masuk	P	49			Keluar	P	5.39	
			T	475				T	78.9	
			H	3377				H	330.8	
			M	10.58				M	9.38	
			Ekstraksi 1	P	5.6	5	High Pressure Heater	Masuk	P	78.5
			T	278.4				T	104.2	
			H	3019				H	436.9	
			M	0.854				M	10.58	
			Ekstraksi 2	P	1.18					
				T	247.4					
				H	2768					
				M	0.34					
	Ekstraksi 3	P	0.584							
		T	85.2							
		H	2623							
		M	0.63							

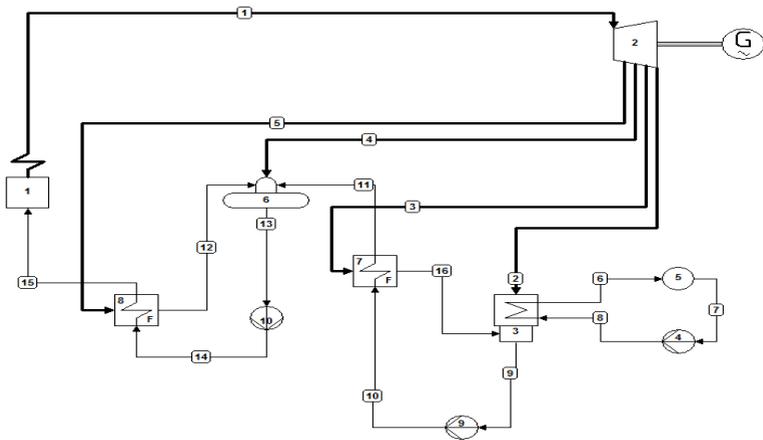


**Gambar 4.1 Skema Aliran *Steam* berdasarkan PLTU Tanjung Balai Karimun**

Analisis terhadap performa suatu sistem pembangkit dapat dilakukan dengan membuat permodelan pada *software cycle tempo* berdasarkan PFD seperti gambar 4.1. Pembangkit listrik tenaga uap di Tanjung Balai Karimun 7 MW berupa daya electricity dengan gross keluaran sebesar 9032 MW terdiri dari beberapa komponen pendukung dan nett daya sebesar 7063 MW dari hasil pengurangan *auxiliary consumption* dan *losses* pada pembangkit. Komponen yang pertama yaitu *boiler* tipe *water tube boiler* berbahan bakar batubara dan menggunakan sistem pembakaran berupa *Traveling Grate with Mechanical Spreader*. Turbin uap yang digunakan berupa *low pressure turbine* dengan 3 buah

ekstraksi. Kondensor yang digunakan bertekanan 0.085 bar. Pembangkit pada Tanjung Balai Karimun memiliki dua macam *feed water heater* yaitu dua *heater* serta satu deaerator. Heater yang digunakan berupa *low pressure heater* dan *high pressure heater*. Macam macam pompa yang digunakan yaitu *condensate pump* dan *feed water pump*.

#### 4.2 Membangun Permodelan Awal Berdasarkan PFD Pembangkit Listrik Tenaga Uap



**Gambar 4.2** Pemodelan pada *Cycle tempo* berdasarkan komponen PLTU Balai Karimun

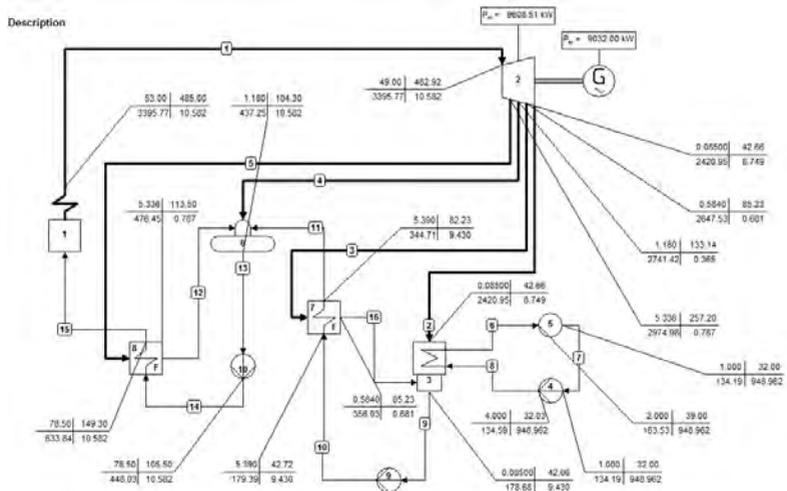
Komponen yang terdapat pada pembangkit menjadi dasar pemodelan pada *software Cycle Tempo* agar dapat dilakukan. Langkah pertama yang dilakukan dalam pemodelan *software Cycle Tempo* adalah memasukkan setiap komponen yang ada seperti gambar 4.2. Setiap komponen atau apparatus harus dimasukkan data yang tersedia di lapangan atau kondisi yang menentukan batasan – batasan sesuai dengan kondisi operasi dari PLTU itu sendiri.

Hasil pemodelan sistem pembangkit pada *software Cycle tempo* harus dijalankan untuk memastikan bahwa kondisi model pembangkit yang ada sesuai dengan kondisi operasi. Hasil yang diperoleh dapat dinyatakan valid apabila setelah dijalankan iterasi tercapai kondisi konvergen. Pemodelan pada *cycle tempo* dikatakan konvergen ketika sistem matriks dapat dibuat.

Component	Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Boiler	1	-1														1		M <sub>1</sub>	0
Turbine	2	1	-1	-1	-1	-1												M <sub>2</sub>	0
Condenser	3		1				-1		1	-1								M <sub>3</sub>	0
Condenser (cooling)	3						-1		1									M <sub>4</sub>	0
Deaerator	6				1							1	1	-1				M <sub>5</sub>	0
Feed Pump	10													1	-1			M <sub>6</sub>	0
Cooling Water Pump	4							1	-1									M <sub>7</sub>	0
Condenser Pump	5									1	-1							M <sub>8</sub>	0
High Pressure Heater	8					1							-1		1	-1		M <sub>9</sub>	0
Low Pressure Heater	7			1							1	-1					-1	M <sub>10</sub>	0
Deaerator	6					h <sub>4</sub>						h <sub>11</sub>	h <sub>12</sub>	-h <sub>13</sub>				M <sub>11</sub>	0
High Pressure Heater	8						h <sub>5</sub>								h <sub>14</sub>	-h <sub>15</sub>		M <sub>12</sub>	0
Low Pressure Heater	7				h <sub>3</sub>						h <sub>10</sub>	-h <sub>11</sub>					-h <sub>16</sub>	M <sub>13</sub>	0
Condenser	3		h <sub>2</sub>				-h <sub>6</sub>		h <sub>8</sub>	h <sub>9</sub>								M <sub>14</sub>	0
Soak	5						h <sub>8</sub>	-h <sub>7</sub>										M <sub>15</sub>	0
Turbine	2		h <sub>1</sub>	-h <sub>2</sub>	-h <sub>3</sub>	-h <sub>4</sub>	-h <sub>5</sub>											M <sub>16</sub>	P <sub>16</sub>

Gambar 4.3 Sistem Matriks Pemodelan PLTU Balai Karimun

Gambar 4.4 merupakan hasil pemodelan pada *cycle tempo* yang konvergen. Pemodelan yang sudah konvergen akan menghasilkan *heat balance* seperti pada gambar dibawah dan beberapa data lainnya.



**Gambar 4.4 Hasil Pemodelan PLTU Tanjung Balai pada *Cycle Tempo***

### 4.3 Perbandingan data *Heat Balance* pada PFD dengan hasil *cycle tempo*

Tabel 4.2 Perbandingan data *heat balance*

No	Nama		PFD	Cycle Tempo	No	Nama		PFD	Cycle Tempo			
1	Boiler	Masuk	P	78.5	78.5	3	Kondensor	Masuk	P	0.085	0.085	
			T	149.5	149.3			T	42.7	42.66		
			H	634.7	633.84			H	2383	2420.95		
			M	10.58	10.582			M	8.75	8.749		
		Keluar	P	53	53	4	Low Pressure Heater	Masuk	P	5.39	5.39	
			T	485	485			T	41.8	42.72		
			H	3393.4	3395.77			H	175.5	179.39		
			M	10.58	10.582			M	9.38	9.43		
	2	Turbin	Masuk	P	49	49			Keluar	P	5.39	5.39
				T	475	482.92				T	78.9	82.23
				H	3377	3395.77				H	330.8	344.71
				M	10.58	10.582				M	9.38	9.43
		Ekstraksi 1	P	5.6	5.336	5	High Pressure Heater	Masuk	P	78.5	78.5	
			T	278.4	257.2			T	104.2	105.5		
			H	3019	2974.98			H	436.9	448.03		
			M	0.854	0.787			M	10.58	10.582		
		Ekstraksi 2	P	1.18	1.18							
			T	247.4	133.14							
			H	2768	2741.42							
			M	0.34	0.365							
		Ekstraksi 3	P	0.584	0.584							
			T	85.2	85.23							
			H	2623	2647.53							
			M	0.63	0.681							

Validasi :

*Mass flow rate* pada PFD 10.58 kg/s

*Mass flow rate* pada *cycle tempo* 10.582%

$$\frac{10.582 - 10.58}{10.58} = 0.00018$$

Pemodelan menggunakan *software cycle tempo* menghasilkan data *heat balance* seperti yang terlihat pada gambar 4.4. Data *heat balance* yang dihasilkan tidak terjadi perbedaan yang sangat jauh dengan data *heat balance* yang dimiliki oleh PFD dibuktikan dengan mengvalidasi data *mass flow rate* keduanya yang dibawah 5%. Data *heat balance cycle*

*tempo* dan PFD ini terdapat pada tabel 4.2 di atas. Perbedaan yang sangat sedikit ini membuktikan bahwa *software cycle tempo* dapat digunakan untuk melakukan analisis selanjutnya.

#### 4.4 Contoh Perhitungan

##### 4.4.1 Perhitungan Menggunakan Software Cycle Tempo

Efisiensi nett dalam *software cycle tempo* didapatkan nilai sebesar 24.058% dalam keadaan beban uap yang diterima sebesar 100%.

- Massa Batu bara yang digunakan

$$MrF = \left( \frac{QrO}{EF_{LHV} \times LHVF} \right)$$

$$MrF = \left( \frac{10.582 \text{ kg/s} \times [3395.77 - 633.84] \text{ kJ/kg}}{15223.404 \text{ kJ/kg} \times 0.24058} \right)$$

$$= 7.98 \text{ kg/s}$$

- *Nett Plant Heat Rate*

$$\text{Nett plant heat rate} = \frac{MrF \times LHVF}{\text{Nett Generating Output}}$$

$$\text{Nett plant heat rate} = \left[ \frac{7.98 \text{ kg/s} \times 15223.404 \text{ kJ/kg}}{7630 \text{ kW}} \right] \times \frac{3600s}{1 h}$$

$$= 57324.45 \text{ kJ/kWh}$$

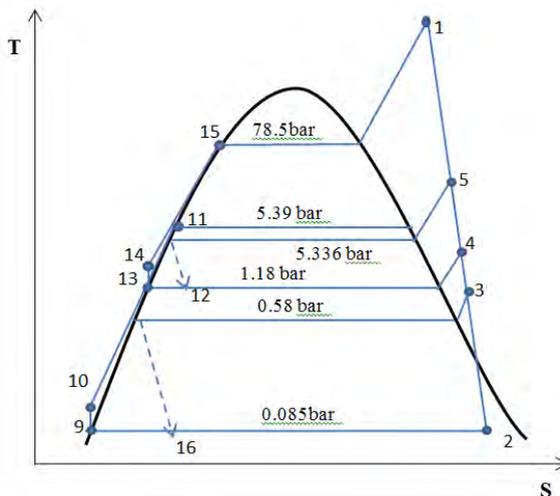
- *Gross Plant Heat Rate*

$$\text{Gross plant heat rate} = \frac{MrFxLHVF}{\text{Gross Generating Output}}$$

$$\begin{aligned} \text{Gross plant heat rate} &= \left[ \frac{7.98 \text{ kg/s} \times 15223.404 \text{ kJ/kg}}{9032 \text{ kW}} \right] \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \\ &= 48426.21 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

#### 4.4.2 Perhitungan Menggunakan Analisis Termodinamika

Grafik dibawah merupakan hasil dari simulasi PLTU Tanjung Balai Karimun dalam keadaan beban 100%. T-s diagram dibawah digunakan untuk analisis perhitungan dalam termodinamika.

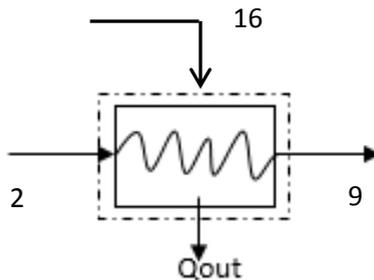


**Gambar 4.5 T-S diagram Tanjung Balai Karimun**

Data didapat melalui tabel A-4 , tabel A-5 dan data berdasarkan *heat balance* dari *cycle tempo*:

$h_{keluar\ boiler\ (1)}$	$3377\ kJ/kg$	$h_{masuk\ LPH\ (10)}$	$179.39\ kJ/kg$
$h_{ekstraksi1\ (5)}$	$3019\ kJ/kg$	$h_{keluar\ deaerator\ (13)}$	$437.25\ kJ/kg$
$h_{ekstraksi2\ (4)}$	$2768\ kJ/kg$	$h_{masuk\ HPH\ (14)}$	$448.03\ kJ/kg$
$h_{ekstraksi3\ (3)}$	$2623\ kJ/kg$	$h_{masuk\ boiler\ (15)}$	$634.7\ kJ/kg$
$h_{masuk\ kondensor\ (2)}$	$2383\ kJ/kg$	$h_{keluar\ kondensor\ (9)}$	$178.68\ kJ/kg$
$h_{backward\ (16)}$	$351.49\ kJ/kg$		

### Menghitung Energi yang dibuang oleh kondenser



$$\dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{Q}_{condensor} + \dot{m}_9 \cdot h_9$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{condensor} &= (0.63\ kg/s \times 351.49\ kJ/kg) \\ &+ (8.75\ kg/s \times 2623\ kJ/kg) \\ &- (9.43\ kg/s \times 178.68\ kJ/kg) = 21487.73\ kJ/s \end{aligned}$$

## Perhitungan Fraksi Massa Ekstraksi

Perhitungan fraksi massa ekstraksi dilakukan dengan menggunakan hukum termodinamika I dengan asumsi adiabatik, energi kinetik dan energi potensial diabaikan serta tidak terdapat kerja yang keluar masuk sistem

### Menentukan fraksi massa pada *High Pressure Feedwater heater*

Data awal yang dibutuhkan untuk menentukan fraksi massa pada *High Pressure heater* sebagai berikut:

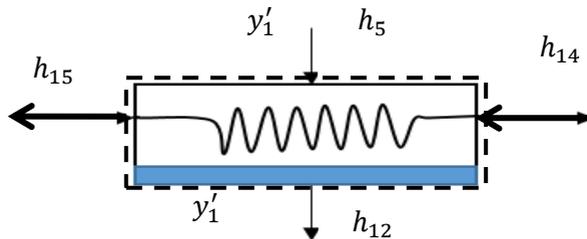
- Pada sisi *steam*

$$h_5 = 3019 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{12} = 651.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Pada sisi *water*

$$h_{15} = 634.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{14} = 448.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Berikut gambar control volume pada *High Pressure Heater*:



Data yang dibutuhkan penulis dapat menentukan fraksi massa yang dibutuhkan pada *feedwater heater* sebagai berikut:

$$y'_1(h_5 - h_{12}) = h_{15} - h_{14}$$

$$y'_1 = \frac{h_{15} - h_{14}}{h_5 - h_{12}}$$

$$y'_1 = \frac{634.7 - 448.03}{3019 - 651.8} = 0.08$$

### Menentukan fraksi massa pada Low Pressure Heater

Data awal yang dibutuhkan untuk menentukan fraksi massa pada *low Pressure heater* sebagai berikut:

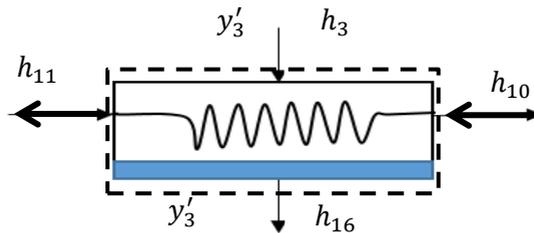
➤ Pada sisi *steam*

$$h_3 = 2623 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad h_{16} = 351.94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

➤ Pada sisi *water*

$$h_{10} = 179.39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad h_{11} = 344.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Berikut gambar control volume pada *Low Pressure heater* :



Data yang dibutuhkan penulis dapat menentukan fraksi massa yang dibutuhkan pada *feedwater heater* sebagai berikut:

$$y'_3(h_3 - h_{16}) = (y'_3 + 1 - y'_1 - y'_2 - y'_3)(h_{11} - h_{10})$$

$$y'_3 = \frac{(1 - y'_1 - y'_2)(h_{11} - h_{10})}{(h_3 - h_{16})}$$

$$y'_3 = \frac{(1 - 0.08 - y'_2)(344.71 - 179.39)}{(2623 - 351.94)} = \frac{(0.92 - y'_2)(165.32)}{2271.06}$$

$$y'_3 = (0.92 - y'_2)(0.072) = 0.07 - 0.072y'_2$$

### Menentukan fraksi massa pada *Deaerator*

Data awal yang dibutuhkan untuk menentukan fraksi massa pada *deaerator* sebagai berikut:

- Pada sisi *steam*

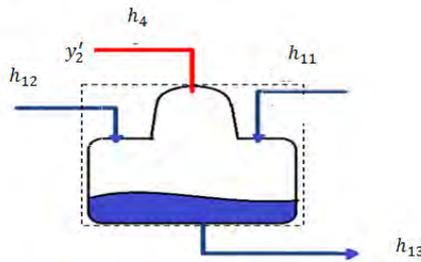
$$h_4 = 2768 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad h_{12} = 651.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{11} = 330.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Pada sisi *water*

$$h_{13} = 437.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Berikut gambar *Control Volume* pada *deaerator*:



Data yang dibutuhkan penulis dapat menentukan fraksi massa yang dibutuhkan pada *deaerator* sebagai berikut:

$$(1 - y_1' - y_2')(h_{11}) + y_2'(h_4) + y_1'(h_{12}) = h_{13}$$

$$(0.92 - y_2') \left( 330.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + y_2' \left( 2768 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 0.08 \left( 651.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 437.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$2437.2y_2' = 80.75$$

$$y_2' = \frac{80.75}{2437.2} = 0.03$$

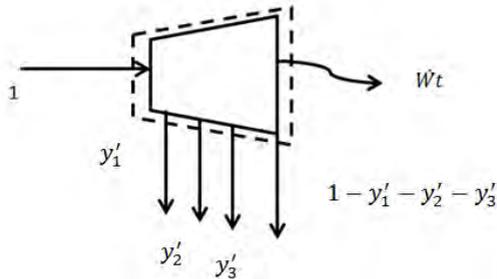
$$y'_3 = 0.07 - 0.072y'_2 = 0.06$$

Perhitungan dalam termodinamika dilakukan dengan menghitung efisiensi pembangkit. Perhitungan efisiensi pembangkit dapat ditunjukkan pada perhitungan di bawah.

- **Efisiensi Pembangkit**

$$\text{Efisiensi pembangkit} = \frac{W_{turbin} - W_{pompa}}{Q_{boiler}}$$

### 1. Menghitung Daya Turbin



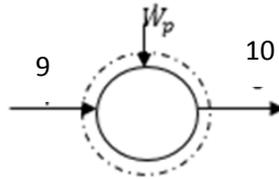
$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - (1 - y'_1 - y'_2 - y'_3)h_2 - y'_1 \cdot h_5 - y'_2 \cdot h_4 - y'_3 \cdot h_3$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{turbin} = & \left[ 3377 \text{ kJ/kg} - (3019 \times 0.08) \text{ kJ/kg} \right. \\ & - (2768 \times 0.03) \text{ kJ/kg} - (2623 \times 0.06) \text{ kJ/kg} \\ & \left. - (2383 \times 0.83) \text{ kJ/kg} \right] \dot{m} \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{turbin} = 917.17 \text{ kJ/kg} \times 10.58 \text{ kg/s} = 9703.65 \text{ kW}$$

## 2. Menghitung Daya Pompa

### 1. Condensate Pump :

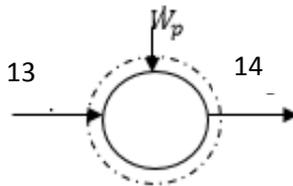


$$\frac{\dot{W}_{pump}}{\dot{m}} = h_{10} - h_9$$

$$\dot{W}_{pump} = [h_{10} - h_9]\dot{m}$$

$$\dot{W}_{pump} = [179.39 - 178.68] \text{ kJ/kg} \times 9.388 \text{ kg/s} = 6.66 \text{ kW}$$

### 2. Feed Pump :



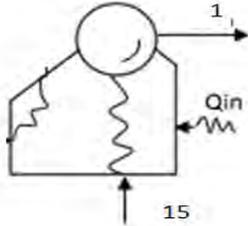
$$\frac{\dot{W}_{pump}}{\dot{m}} = h_{14} - h_{13}$$

$$\dot{W}_{pump} = [h_{14} - h_{13}]\dot{m}$$

$$\dot{W}_{pump} = [448.03 - 437.25] \text{ kJ/kg} \times 10.58 \text{ kg/s}$$

$$= 114.05 \text{ kW}$$

### 3. Menghitung Panas yang diserap Boiler



$$\frac{\dot{Q}_{boiler}}{\dot{m}} = h_1 - h_{15}$$

$$\dot{Q}_{boiler} = [h_1 - h_{15}] \dot{m}$$

$$\dot{Q}_{boiler} = [3377 - 634.7] \text{ kJ/kg} \times 10.58 \text{ kg/s}$$

$$= 29013.534 \text{ kW}$$

**Efisiensi siklus pembangkit**

$$= \frac{9703.65 \text{ kW} - 6.66 \text{ kW} - 114.05 \text{ kW}}{29013.534 \text{ kW}}$$

$$= 0.3303$$

- Massa Batu bara yang digunakan

$$MrF = \left( \frac{QrO}{EF_{LHV} \times LHVF} \right)$$

$$MrF = \left( \frac{10.58 \text{ kg/s} \times [3377 - 634.7] \text{ kJ/kg}}{15223.404 \text{ kJ/kg} \times 0.3303} \right)$$

$$= 5.77 \text{ kg/s}$$

- *Nett Plant Heat Rate*

$$\text{Nett plant heat rate} = \frac{MrF \times LHVF}{\text{Nett Generating Output}}$$

$$\begin{aligned} \text{Nett plant heat rate} &= \left[ \frac{5.77 \text{ kg/s} \times 15223.404 \text{ kJ/kg}}{7630 \text{ kW}} \right] \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \\ &= 41445.79 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

- *Gross Plant Heat Rate*

$$\begin{aligned} \text{Gross plant heat rate} \\ &= \frac{MrFxLHVF}{\text{Gross Generating Output}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gross plant heat rate} &= \left[ \frac{5.77 \text{ kg/s} \times 15223.404 \text{ kJ/kg}}{9032 \text{ kW}} \right] \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \\ &= 35012.33 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

Tabel 4.3 Data Hasil setelah Dilakukan Variasi Pembebanan

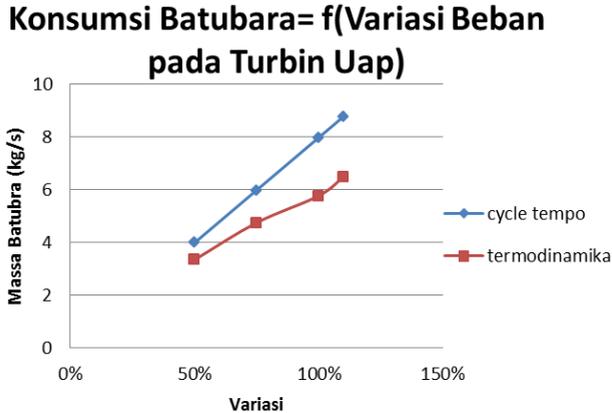
Daya (kW)	Konsumsi batubara (cycle tempo) kg/s	Konsumsi batubara (termodinamika) kg/s
4516	3.99	3.35
6774	5.99	4.75
9032	7.98	5.77
9935	8.78	6.49

Daya (kW)	Nett Heat Rate (cycle tempo) kJ/kWh	Nett heat rate (termodinamika) kJ/kWh
4516	57357.18	48083.55
6774	57334.56	45513.98
9032	57324.45	41445.79
9935	57315.67	40893.18

Daya (kW)	Gross Heat Rate (cycle tempo) kJ/kWh	Gross heat rate (termodinamika) kJ/kWh
4516	48453.86	40619.74
6774	48434.75	38449.03
9032	48426.21	35012.33
9935	48419.28	34406.16

## 4.5 Analisis PLTU Tanjung Balai Karimun setelah Dilakukan Variasi Beban pada Turbin Uap

### 4.5.1 Analisis Konsumsi Batubara yang Digunakan Versus Variasi Beban pada Turbin uap



**Gambar 4.6 Grafik Konsumsi Batubara Versus Variasi Beban pada Turbin**

Grafik diatas menunjukkan hasil konsumsi batubara yang digunakan oleh pembangkit dengan mengvariasikan beban yang diterima oleh turbin uap. Grafik tersebut menunjukkan dua *trenline*, yaitu dalam perhitungan dengan *software cycle tempo* dan perhitungan dengan menggunakan termodinamika. *Trenline* keduanya sama memiliki tren yang terus naik seiring dengan meningkatnya beban yang diberikan pada turbin. Konsumsi batubara dengan menggunakan perhitungan termodinamika jauh lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan menggunakan *cycle tempo*. Pada beban 50% pada turbin uap membutuhkan batubara sebanyak 3.35 kg/s dalam perhitungan termodinamika sedangkan pada *cycle tempo* sebesar 3.99 kg/s. Pada beban 75% pada turbin uap

mempunyai kebutuhan batubara sebanyak 4.75 kg/s dalam perhitungan termodinamika sedangkan pada *cycle tempo* sebesar 5.98 kg/s. Pada beban 100% pada turbin uap membutuhkan batubara sebanyak 5.77 kg/s dalam perhitungan termodinamika sedangkan pada *cycle tempo* sebesar 7.98 kg/s. Pada beban 110% pada turbin uap membutuhkan batubara sebanyak 6.49 kg/s dalam perhitungan termodinamika sedangkan pada *cycle tempo* sebesar 8.77 kg/s.

Kenaikan trenline pada grafik 4.6 sesuai dengan data *mass flow rate* seperti yang terlihat pada tabel 4.4. Nilai *mass flow rate* meningkat sesuai beban yang diberikan pada pembangkit. Nilai *mass flow* mempengaruhi nilai efisiensi *nett* dari pembangkit, semakin tinggi nilai *mass flow* semakin tinggi pula *nett* efisiensinya.

Tabel 4.4 Data Mass Flow Rate

Daya (kW)	Mass Flow Rate (kg/s)	
	<i>cycle tempo</i>	<i>PFD</i>
4516.00	5.29	6.08
6774.00	7.94	8.69
9032.00	10.58	10.58
9935.10	11.64	11.91

Tabel 4.5 Data Efisiensi

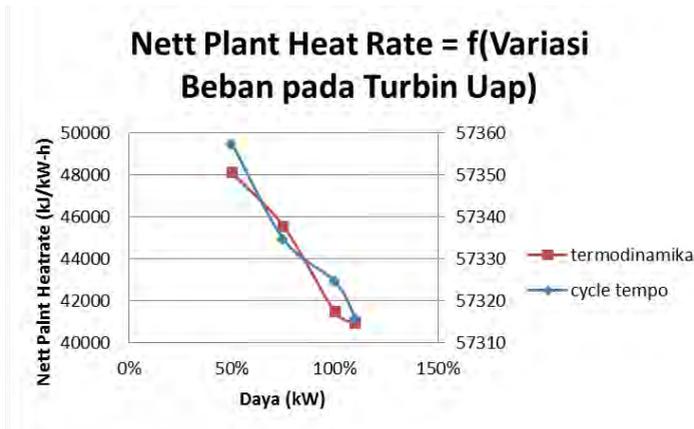
Daya (kW)	Nett Efisiensi	Nett Efisiensi
	(Cycle Tempo)	(Termodinamika)
4516	0.24042	0.32721259
6774	0.24053	0.32938716
9032	0.24058	0.33029209
9935	0.24059	0.33075672

Nilai Efisiensi *nett* dapat dilihat pada tabel 4.5. Efisiensi yang dihasilkan dari *cycle tempo* jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai efisiensi dalam perhitungan termodinamika. Nilai efisiensi dalam perhitungan *cycle tempo* lebih rendah karena

efisiensi tiap komponen mempengaruhi dalam perhitungan. Perhitungan menggunakan termodinamika mengabaikan efisiensi dari komponen dalam pembangkit sehingga nilai yang didapat lebih besar. Perbedaan nilai efisiensi ini mengakibatkan nilai dari konsumsi batubara dalam *cycle tempo* lebih besar dibandingkan dengan dalam perhitungan termodinamika.

Fenomena grafik diatas sesuai dengan data yang digunakan. Beban yang diterima oleh turbin uap berbanding lurus dengan konsumsi batubara. Alir massa pada pembangkit dipengaruhi oleh banyaknya beban yang diterima turbin uap. Alir massa pada saat beban 50% lebih kecil dibanding dengan saat beban 100%. Keadaan alir massa yang berbeda ini membuat perbedaan efisiensi nett pada pembangkit. Semakin kecil alir massa membuat semakin kecil nilai efisiensi nett pembangkit karena keadaan setiap komponen pada pembangkit yang seharusnya dapat menerima beban 100% tetapi hanya menerima 50% saja. Energi yang diserap pada pembangkit juga lebih kecil karena laju alir massa dalam jumlah yang kecil. Pengaruh pembebanan dengan konsumsi batubara yang digunakan berdasarkan energi yang diserap dan nilai efisiensi nett.

#### 4.5.2 Analisis *Nett Plant Heat Rate* Versus Variasi Beban Pada Turbin Uap



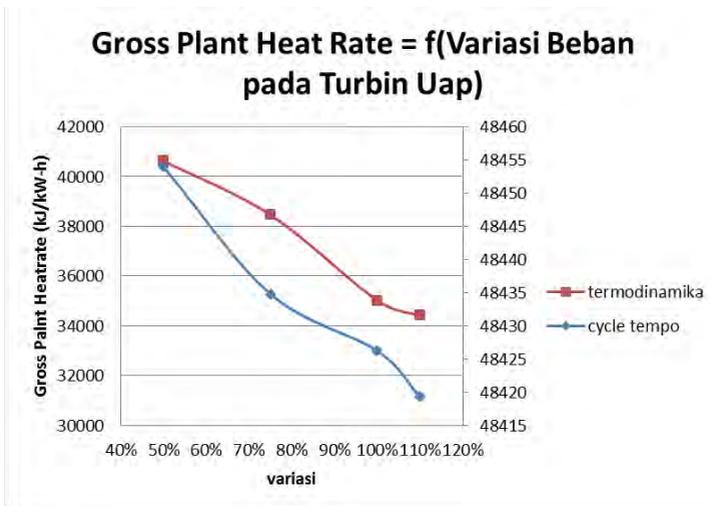
**Gambar 4.7 Grafik *Nett Plant Heat Rate* Versus Variasi Beban pada Turbin**

Grafik diatas menunjukkan pengaruh antara *nett plant heat rate* dengan mengvariasikan beban yang diterima oleh turbin uap. Grafik tersebut menunjukkan dua trenline, yaitu dalam perhitungan dengan *software cycle tempo* dan perhitungan dengan menggunakan termodinamika. *Trenline* yang dimiliki oleh termodinamika dan perhitungan *cycle tempo* terus turun sesuai peningkatan beban pada turbin. *Nett plant heat rate* dengan menggunakan perhitungan termodinamika jauh lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan menggunakan *cycle tempo*. Data pada grafik diatas dapat dilihat pada tabel 4.3.

Data efisiensi pembangkit yang ditunjukkan pada tabel 4.5 menyatakan bahwa efisiensi meningkat sesuai meningkatnya pembebanan pada turbin uap. Jumlah efisiensi yang dihasilkan dari perhitungan *cycle tempo* jauh lebih kecil dibandingkan dengan jumlah efisiensi dalam perhitungan

termodinamika karena efisiensi di tiap komponen tidak diabaikan. Peningkatan jumlah efisiensi berbanding terbalik dengan nilai *nett plant heat rate*. *Nett heat rate* menurun sesuai peningkatan pembebanan pada turbin uap. Berdasarkan jumlah efisiensi seperti pada tabel 4.5, nilai dari *nett plant heat rate* dalam *cycle tempo* lebih besar dibandingkan dengan dalam perhitungan termodinamika.

#### 4.5.3 Analisis *Gross Plant Heat Rate* Versus Variasi Beban pada Turbin Uap

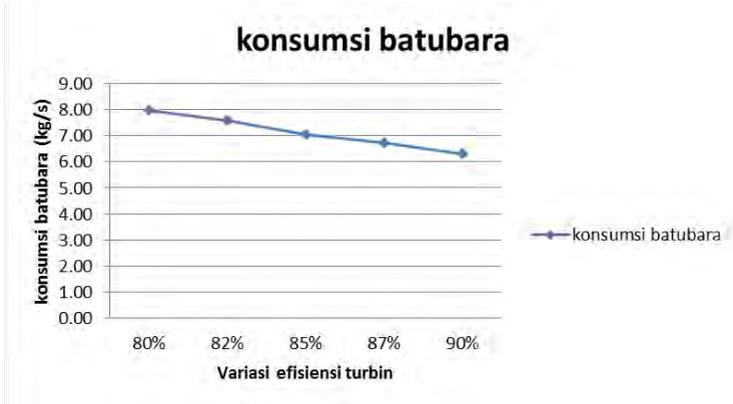


**Gambar 4.8 *Gross Plant Heat Rate* Versus Variasi Beban pada Turbin**

Grafik diatas menunjukkan pengaruh antara *Gross plant heat rate* dengan mengvariasikan beban yang diterima oleh turbin uap. Grafik tersebut menunjukkan dua trenline, yaitu dalam perhitungan dengan *software cycle tempo* dan perhitungan dengan menggunakan termodinamika. Trenline yang dimiliki oleh termodinamika dan perhitungan *cycle tempo* terus turun sesuai peningkatan beban pada turbin. *Gross plant heat rate* dengan menggunakan perhitungan termodinamika jauh lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan menggunakan *cycle tempo*. Data grafik di atas dapat dilihat pada tabel 4.3.

Data efisiensi pembangkit yang ditunjukkan pada tabel 4.5 menyatakan bahwa efisiensi meningkat sesuai meningkatnya pembebanan pada turbin uap. Jumlah efisiensi yang dihasilkan dari perhitungan *cycle tempo* jauh lebih kecil dibandingkan dengan jumlah efisiensi dalam perhitungan termodinamika karena pada *cycle tempo*, efisiensi setiap komponen tidak diabaikan. Peningkatan jumlah efisiensi berbanding terbalik dengan nilai *gross plant heat rate*. *Gross heat rate* menurun sesuai peningkatan pembebanan pada turbin uap. Berdasarkan jumlah efisiensi seperti tabel 4.5 mengakibatkan nilai dari *gross plant heat rate* dalam *cycle tempo* lebih kecil dibandingkan dengan dalam perhitungan termodinamika.

#### 4.5.4 Analisis Konsumsi Batubara Versus Variasi Efisiensi pada Turbin Uap dalam Perhitungan *Cycle Tempo*



Gambar 4.9 Grafik Konsumsi Batubara versus Variasi Efisiensi Turbin

Grafik diatas menunjukkan hasil pengaruh variasi pada efisiensi turbin terhadap konsumsi batubara yang dibutuhkan pada pembangkit. Konsumsi batubara terus menurun seiring dengan meningkatnya efisiensi pada turbin uap sebesar 80%; 82%; 85%; 87% dan 90%. Nilai yang ditunjukkan ketika efisiensi turbin 80% sebesar 7.98 kg/s; pada efisiensi 82% sebesar 7.59%; efisiensi 85% dengan nilai sebesar 7.06 kg/s; efisiensi 87% dengan nilai 6.73 kg/s dan efisiensi turbin 90% sebesar 6.29 kg/s.

*Trenline* yang menurun pada grafik 4.9 sesuai dengan penurunan *mass flow rate* pada pembangkit seperti pada tabel 4.6 di bawah. Nilai *mass flow rate* berbanding terbalik dengan nilai efisiensi turbin. Nilai *mass flow rate* yang terus menurun ini mempengaruhi nilai konsumsi batubara yang dibutuhkan

pembangkit sesuai rumus perhitungan yang digunakan. Nett efisiensi pembangkit mengalami peningkatan seiring peningkatan efisiensi pada turbin uap yang dapat dilihat pada tabel 4.7. Nilai nett efisiensi pada pembangkit berbanding terbalik dengan penurunan konsumsi batubara sesuai rumus yang digunakan.

Tabel 4.6 Data variasi efisiensi turbin terhadap *mass flow rate*

variasi turbin	mass flow (kg/s)
80%	10.58
82%	10.32
85%	9.96
87%	9.73
90%	9.40

Tabel 4.7 Data variasi efisiensi turbin terhadap efisiensi pembangkit

variasi turbin	efisiensi pembangkit
80%	0.24059
82%	0.24674
85%	0.25595
87%	0.26209
90%	0.2713

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Analisis peforma PLTU versus beban pada turbin uap dengan menggunakan *software cycle tempo* telah dilakukan dan didapatkan hasil. Analisis ini mendapatkan kesimpulan seperti berikut:

1. Perbedaan beban pada turbin uap sebesar 50%; 75%; 100% dan 110% didapatkan kenaikan konsumsi batubara pada PLTU Tanjung Balai Karimun sebesar 3.35 kg/s; 4.75 kg/s; 5.77 kg/s dan 6.49 kg/s dalam perhitungan termodinamika. Kenaikkan konsumsi batubara menggunakan perhitungan dengan *cycle tempo* sebesar 3.99 kg/s; 5.98 kg/s; 7.98 kg/s dan 8.77 kg/s.
2. Nilai *nett heat rate* dari PLTU Tanjung Balai Karimun dengan pembebanan pada turbin uap sebesar 50%; 75%; 100% dan 110% didapatkan hasil yang menurun. Nilai *nett heat rate* dalam perhitungan termodinamika sebesar 48083.55 kJ/kW-h; 45513.98 kJ/kW-h; 41445.79 kJ/kW-h dan 40893.18 kJ/kW-h . Nilai *nett heat rate* terus turun sesuai dengan kenaikan beban dalam perhitungan menggunakan *cycle tempo*, yaitu 57357.18 kJ/kW-h; 57334.56 kJ/kW-h; 57324.45 kJ/kW-h dan 57315.67 kJ/kW-h.
3. Nilai *gross heat rate* dari PLTU Tanjung Balai Karimun dengan pembebanan pada turbin uap sebesar 50%; 75%; 100% dan 110% didapatkan nilai yang terus menurun. Nilai *gross heat rate* dalam perhitungan termodinamika

sebesar 40619.74 kJ/kW-h; 38449.03 kJ/kW-h; 35012.33 kJ/kW-h dan 34406.16 kJ/kW-h. Nilai *gross heat rate* yang didapat dari perhitungan dalam *cycle tempo* terus turun seiring kenaikan beban, sebesar 48453.86 kJ/kW-h; 48434.75 kJ/kW-h; 48426.21 kJ/kW-h dan 48419.28 kJ/kW-h.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang bisa diberikan setelah pelaksanaan tugas akhir antara lain sebagai berikut :

1. Data setiap komponen dari PLTU Tanjung Balai Karimun harus lebih lengkap seperti nilai *exfuel*, nilai efisiensi perkomponen, dan spesifikasi perkomponen agar mempermudah permodelan dan menganalisis PLTU.
2. Info mengenai penggunaan *software cycle tempo* perlu lebih banyak agar mempermudah menjalankan *software* seperti dasar perhitungan.

# Lampiran

**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.

**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	2549.6	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	1261.0	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.

TABLE A-3 (Continued)

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 $s_g$	
120.	324.8	1.5267	0.01426	1473.0	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	5.4924	120.
130.	330.9	1.5671	0.01278	1511.1	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	5.4323	130.
140.	336.8	1.6107	0.01149	1548.6	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	5.3717	140.
150.	342.2	1.6581	0.01034	1585.6	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	5.3098	150.
160.	347.4	1.7107	0.009306	1622.7	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	5.2455	160.
170.	352.4	1.7702	0.008364	1660.2	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	5.1777	170.
180.	357.1	1.8397	0.007489	1698.9	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	5.1044	180.
190.	361.5	1.9243	0.006657	1739.9	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	5.0228	190.
200.	365.8	2.036	0.005834	1785.6	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	4.9269	200.
220.9	374.1	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	220.9

H<sub>2</sub>O

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

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>p</i> = 0.06 bar = 0.006 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 36.16°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
<i>p</i> = 0.70 bar = 0.07 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 89.95°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	9.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
<i>p</i> = 1.5 bar = 0.15 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 111.37°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
<i>p</i> = 3.0 bar = 0.30 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 133.55°C)								

**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

**TABLE A-4** (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>p</i> = 5.0 bar = 0.50 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 151.86°C)				<i>p</i> = 7.0 bar = 0.70 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 164.97°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
<i>p</i> = 10.0 bar = 1.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 179.91°C)				<i>p</i> = 15.0 bar = 1.5 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 198.32°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
<i>p</i> = 20.0 bar = 2.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 212.42°C)				<i>p</i> = 30.0 bar = 3.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 233.90°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

**TABLE A-4** (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>p</i> = 40 bar = 4.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 250.4°C)				<i>p</i> = 60 bar = 6.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 275.64°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
<i>p</i> = 80 bar = 8.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 295.06°C)				<i>p</i> = 100 bar = 10.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 311.06°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
<i>p</i> = 120 bar = 12.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 324.75°C)				<i>p</i> = 140 bar = 14.0 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 336.75°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

**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
$p = 160 \text{ bar} = 16.0 \text{ MPa}$				$p = 180 \text{ bar} = 18.0 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 347.44^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 357.06^\circ\text{C})$				
Sat.	0.00931	2431.7	2580.6	5.2455	0.00749	2374.3	2509.1	5.1044
360	0.01105	2539.0	2715.8	5.4614	0.00809	2418.9	2564.5	5.1922
400	0.01426	2719.4	2947.6	5.8175	0.01190	2672.8	2887.0	5.6887
440	0.01652	2839.4	3103.7	6.0429	0.01414	2808.2	3062.8	5.9428
480	0.01842	2939.7	3234.4	6.2215	0.01596	2915.9	3203.2	6.1345
520	0.02013	3031.1	3353.3	6.3752	0.01757	3011.8	3378.0	6.2960
560	0.02172	3117.8	3465.4	6.5132	0.01904	3101.7	3444.4	6.4392
600	0.02323	3201.8	3573.5	6.6399	0.02042	3188.0	3555.6	6.5696
640	0.02467	3284.2	3678.9	6.7580	0.02174	3272.3	3663.6	6.6905
700	0.02674	3406.0	3833.9	6.9224	0.02362	3396.3	3821.5	6.8580
740	0.02808	3486.7	3935.9	7.0251	0.02483	3478.0	3925.0	6.9623
$p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}$				$p = 240 \text{ bar} = 24.0 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 385.83^\circ\text{C})$				
Sat.	0.00583	2293.0	2409.7	4.9269	0.00673	2477.8	2639.4	5.2393
400	0.00994	2619.3	2818.1	5.5540	0.00929	2700.6	2923.4	5.6506
440	0.01222	2774.9	3019.4	5.8450	0.01100	2838.3	3102.3	5.8950
480	0.01399	2891.2	3170.8	6.0518	0.01241	2950.5	3248.5	6.0842
520	0.01551	2992.0	3302.2	6.2218	0.01366	3051.1	3379.0	6.2448
560	0.01689	3085.2	3423.0	6.3705	0.01481	3145.2	3500.7	6.3875
600	0.01818	3174.0	3537.6	6.5048	0.01588	3235.5	3616.7	6.5174
640	0.01940	3260.2	3648.1	6.6286	0.01739	3366.4	3783.8	6.6947
700	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993	0.01835	3451.7	3892.1	6.8038
740	0.02224	3469.3	3914.1	6.9052	0.01974	3578.0	4051.6	6.9567
800	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544				
$p = 280 \text{ bar} = 28.0 \text{ MPa}$				$p = 320 \text{ bar} = 32.0 \text{ MPa}$				
400	0.00383	2223.5	2330.7	4.7494	0.00236	1980.4	2055.9	4.3239
440	0.00712	2613.2	2812.6	5.4494	0.00544	2309.0	2683.0	5.2327
480	0.00885	2780.8	3028.5	5.7446	0.00722	2718.1	2949.2	5.5968
520	0.01020	2906.8	3192.3	5.9566	0.00853	2860.7	3133.7	5.8357
560	0.01136	3015.7	3333.7	6.1307	0.00963	2979.0	3287.2	6.0246
600	0.01241	3115.6	3463.0	6.2823	0.01061	3085.3	3424.6	6.1858
640	0.01338	3210.3	3584.8	6.4187	0.01150	3184.5	3552.5	6.3290
700	0.01473	3346.1	3758.4	6.6029	0.01273	3325.4	3732.8	6.5203
740	0.01558	3433.9	3870.0	6.7153	0.01350	3415.9	3847.8	6.6361
800	0.01680	3563.1	4033.4	6.8720	0.01460	3548.0	4015.1	6.7966
900	0.01873	3774.3	4298.8	7.1084	0.01633	3762.7	4285.1	7.0372

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers ANSI/ASME PTC 4**, 2008. "*Performance Test Code Fired Steam Generator*".
- Moran MJ, Shapiro HN**. 2006. "*Fundamentals of Engineering Thermodynamics*". John Wiley & Sons Inc.
- M. M. Rashidi, A. Aghagoli, and M. Ali**. 2014. "*Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters M*". Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering
- M S Jamel, A Abd Rahman and A H Shamsuddin**. 2013. "*Simulation of Existing Gas-Fuelled Conventional Steam Power Plant Using Cycle Tempo*". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 16 (2013) 012005

## Biodata Penulis



Nama Sekar Satiti, lahir di kota Surabaya tanggal 18 Nopember 1993. Anak pertama dari 3 bersaudara dengan ayah bernama Irawan dan ibu yang bernama Sri Retno Tartiningrum. Penulis mengawali pendidikan di Taman kanak kanak Al Huda pada tahun 1997. Pada tahun 1999, penulis memasuki sekolah dasar di SD Laboratorium Unesa hingga tahun 2005. Penulis melanjutkan SMP di Al Hikmah Surabaya pada tahun 2005 hingga 2008 setelah itu melanjutkan ke SMAN 15 Surabaya pada tahun 2008 hingga 2011. Terakhir penulis mengambil kuliah di Teknik Mesin FTI ITS.

Penulis pada saat di Teknik Mesin aktif mengikuti beberapa kegiatan yang diselenggarakan oleh jurusan ataupun skala nasional. Dalam skala nasional, penulis berkesempatan untuk menjadi koordinator dari salah satu divisi pada tahun 2014. Dalam skala jurusan, penulis pernah menjadi salah satu chif divisi dalam acara pada tahun 2013. Penulis pernah menjadi asisten dari praktikum perpindahan panas dan massa di Teknik Mesin ITS.

Penulis mengharapkan dapat membagi ilmu yang telah dipelajari selama ini dari awal mengenyam pendidikan hingga tamat kuliah.

Kontak Penulis : [sekar18satiti@yahoo.com](mailto:sekar18satiti@yahoo.com)