

**PENGARUH PENGGUNAAN JUMLAH TINGKAT *FEED WATER*
HEATER TERHADAP *PERFORMANCE* PLTU PAITON UNIT 5**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ILHAM BARADAKSA
NIM. 145060201111090**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENGGUNAAN JUMLAH TINGKAT *FEED WATER*
HEATER TERHADAP *PERFORMANCE* PLTU PAITON UNIT 5**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ILHAM BARADAKSA
NIM. 145060201111090

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 18 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

Dosen Pembimbing II

Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.
NIP. 19890102 201504 2 002

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



JUDUL SKRIPSI:

**PENGARUH PENGGUNAAN JUMLAH TINGKAT *FEED WATER HEATER*
TERHADAP *PERFORMANCE* PLTU PAITON UNIT 5**

Nama Mahasiswa : Ilham Baradaksa
NIM : 145060201111090
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT.
Pembimbing II : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 9 Juli 2018
SK Penguji : 1390/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 18 Juli 2018
Mahasiswa,



Ilham Baradaksa
NIM. 145060201111090



TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 110/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

ILHAM BARADAKSA

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH PENGGUNAAN JUMLAH TINGKAT FEED WATER HEATER TERHADAP
PERFORMANCE PLTU PAITON UNIT 5**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **17 JUL 2018**

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518-199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



*Teriring Doa Serta Sholawat,
Karya Ilmiah Ini Saya Tunjukkan Kepada :
Ayah Dan Ibu Tercinta, Serta Seluruh Keluarga Besar Saya.*

Untuk Bangsa Indonesia Yang Berdaulat Dan Mandiri.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, ``Pengaruh Penggunaan Jumlah Tingkat *Feed Water Heater* Terhadap *Performance* PLTU Paiton Unit 5'' dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasullulah Muhammad SAW.

Dalam kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya skripsi ini, terutama kepada :

1. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
2. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
3. Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST., M.T. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi.
4. Dr.Eng. Lilis Yulianti, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberi banyak pengetahuan, motivasi, bimbingan, dan arahan dengan sabar dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan wawasan baru, motivasi, bimbingan, arahan, dan teguran demi kesempurnaan penulisan skripsi ini.
6. Bapak Rudianto Raharjo ST.,MT. selaku dosen wali yang telah memberikan pengarahan dalam menempuh perkuliahan pada setiap semester.
7. Seluruh Dosen Pengajar dan Staf Administrasi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan baik dalam penyusunan skripsi maupun administrasi selama penyusunan.
8. Seluruh *Engineer* dan Staf PT. YTL JAWA TIMUR, khususnya Mas Panji Pulanjiwo dan Mas Ido Jerry yang dengan sabar membimbing saat pengambilan data serta membekali ilmu yang sangat banyak sekali.
9. Ayah dan Ibu tercinta, Nandung Pujiarto dan Titiiek Farida, yang selalu memberikan kasih sayang, cinta, doa, kepercayaan dan dukungan kepada penulis. Serta menjadi motivasi terbesar bagi penulis untuk terus berkembang dan menjadi manusia yang manusiawi, berguna untuk nusa, bangsa, negara dan agama.

10. (Alm.) Bapak S. Tarno yang telah memberikan doa dan dukungan kepada penulis, bercita-cita menemani penulis sampai wisuda namun Allah SWT menempatkan beliau di sisi-Nya lebih cepat.
11. Keluarga Besar Red Fam's dan Tarno's Family, khususnya Mbak Iniet, Mas Ido dan Mbak Wena yang selalu mendukung, mendoakan dan mengajarkan banyak hal selama penulis menuntut ilmu hingga terselesaikan dengan baik.
12. Keluarga Besar Laboratorium Fenomena Dasar Mesin, Lek Joko, Mas Kipo, Mas Jan, Mas Gede, Mas Ragang, Mas Indra, Mbak Endang, Mas Arab, Mas Nopal, Mas Uyab, Mas Unggar, Mbak Ayuk, Satrio, TA, Jeki, Putri, Moniq, Natasha, Ilham, Dono, Arul, Erlangga, Rizalul, WT Nopal, Ipay, Ifada, atas doa, semangat, hiburan dan dukungannya kepada penulis.
13. Teman-teman MOLAS, Ichsan, Raka, Farhan, Dhio, Difta, Aries, Maul yang telah menemani penulis dari jaman maba hingga dapat menyelesaikan perkuliahan di Mesin.
14. Teman-teman Lodoyo, Ari, Riki, Hega, Faisal, Nindi, Niken, Tiara, Sisil.
15. Teman-teman SMASA Choir, Impossible Band, Mboys Band, Tua Muda, Not Slipknot, dan band-band dadakan selama di Mesin.
16. Saudara – saudari seperjuangan M'14 "MAF14". Terimakasih telah menemani, menjadi keluarga, berjuang melewati kerasnya hidup di mesin, dan selalu mensupport acara-acara yang ada di mesin.
17. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
18. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang lebih baik. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut dan kemajuan kita bersama.

Malang, 8 Juni 2018

Penulis
(Ilham Baradaksa)

DAFTAR ISI

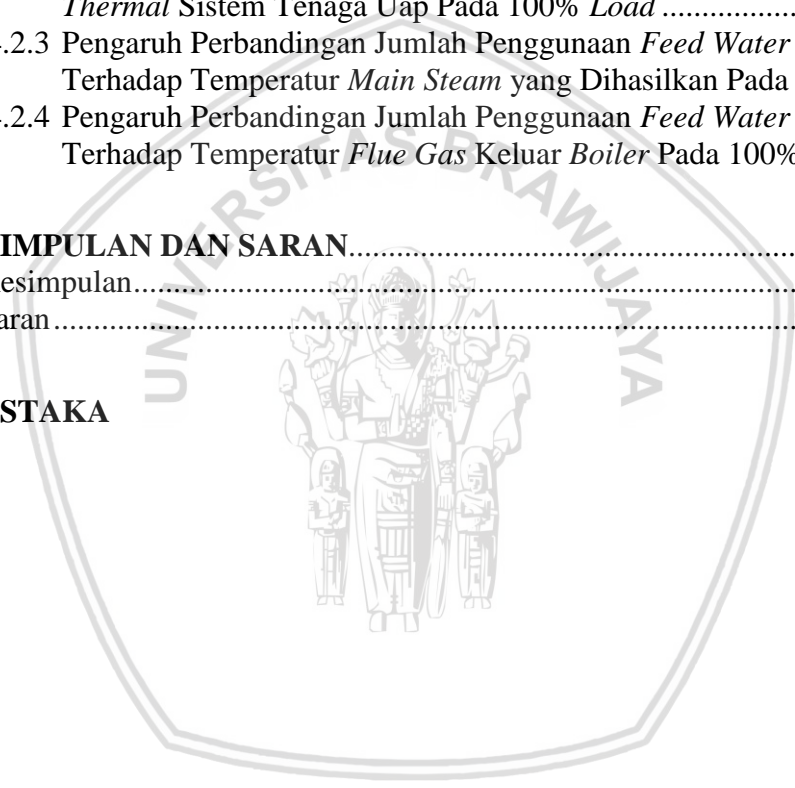
	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Sistem Tenaga Uap	6
2.3 Siklus Rankine	9
2.3.1 Siklus Rankine Aktual	11
2.3.2 Siklus Rankine Hingga Panas Lanjut	12
2.3.3 Siklus Rankine dengan Pemanasan Ulang	13
2.4 Siklus Rankine dengan Regenerasi	14
2.5 <i>Feed Water Heater</i>	15
2.5.1 <i>Open (Direct Contact) Feed Water Heater</i>	16
2.5.2 <i>Closed Feed Water Heater Cascaded Backward</i>	17
2.5.3 <i>Closed Feed Water Heater Pumped Forward</i>	18
2.6 <i>Performance</i> Sistem Tenaga Uap	20
2.6.1 <i>Heat Rate</i>	20
2.6.2 Efisiensi <i>Thermal</i>	20
2.7 Hipotesis	21
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.2 Variabel Penelitian	23
3.2.1 Variabel Bebas	24
3.2.2 Variabel Terikat	24
3.2.3 Variabel Terkontrol	24
3.3 Skema Instalasi dan Spesifikasi Alat	25
3.4 Analisis dan Perhitungan <i>Performance</i> PLTU Paiton Unit 5	28



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Data dan Perhitungan	35
4.1.1 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> (8 Tingkat).....	35
4.1.1.1 Perhitungan Entalpi di Tiap Titik	38
4.1.1.2 Perhitungan <i>Heat Rate</i>	40
4.1.1.3 Perhitungan Efisiensi <i>Thermal</i>	41
4.1.2 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> (7 Tingkat).....	42
4.1.2.1 Perhitungan Entalpi di Tiap Titik	44
4.1.2.2 Perhitungan <i>Heat Rate</i>	46
4.1.2.3 Perhitungan Efisiensi <i>Thermal</i>	47
4.2 Grafik dan Pembahasan.....	48
4.2.1 Perbandingan Jumlah Tingkat <i>Feed Water Heater</i> Terhadap <i>Heat Rate</i> Sistem Tenaga Uap Pada 100% <i>Load</i>	48
4.2.2 Perbandingan Jumlah Tingkat <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Efisiensi <i>Thermal</i> Sistem Tenaga Uap Pada 100% <i>Load</i>	49
4.2.3 Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Temperatur <i>Main Steam</i> yang Dihasilkan Pada 100% <i>Load</i> 51	
4.2.4 Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Temperatur <i>Flue Gas</i> Keluar <i>Boiler</i> Pada 100% <i>Load</i>	53
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran	56

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Data 1 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	36
Tabel 4.2	Data 2 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	36
Tabel 4.3	Data 3 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	36
Tabel 4.4	Data 4 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	37
Tabel 4.5	Data 5 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	37
Tabel 4.6	Data 6 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	38
Tabel 4.7	Data Entalpi Untuk Data 1 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	39
Tabel 4.8	Data Entalpi Untuk Data 2 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	39
Tabel 4.9	Data Entalpi Untuk Data 3 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	39
Tabel 4.10	Data Entalpi Untuk Data 4 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	40
Tabel 4.11	Data Entalpi Untuk Data 5 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	40
Tabel 4.12	Data Entalpi Untuk Data 6 <i>Feed Water Heater A8 In Service</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	40
Tabel 4.13	Hasil Perhitungan <i>Performance Unit 5</i> saat <i>FWH A8 In Service</i>	41
Tabel 4.14	Data 1 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	42
Tabel 4.15	Data 2 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	42
Tabel 4.16	Data 3 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	43
Tabel 4.17	Data 4 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	43
Tabel 4.18	Data 5 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	43
Tabel 4.19	Data 6 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	44
Tabel 4.20	Data Entalpi Untuk Data 1 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	45
Tabel 4.21	Data Entalpi Untuk Data 2 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	45
Tabel 4.22	Data Entalpi Untuk Data 3 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	45
Tabel 4.23	Data Entalpi Untuk Data 4 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	46
Tabel 4.24	Data Entalpi Untuk Data 5 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	46
Tabel 4.25	Data Entalpi Untuk Data 6 <i>Feed Water Heater A8 Bypass</i> Pada Kondisi 100% <i>Load</i>	46
Tabel 4.26	Hasil Perhitungan <i>Performance Unit 5</i> saat <i>FWH A8 Bypass</i>	47



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
<i>Gambar 2.1</i>	Ekstraksi Uap Dari HP Turbin	6
<i>Gambar 2.2</i>	Skema Instalasi PLTU Paiton Unit 5 (PT. YTL Jawa Power)	7
<i>Gambar 2.3</i>	Siklus Rankine Ideal	9
<i>Gambar 2.4</i>	a). Pergeseran siklus daya uap aktual dari siklus Rankine yang ideal. b). Pengaruh pompa dan ireversibilitas turbin pada siklus Rankine yang ideal	12
<i>Gambar 2.5</i>	Siklus Rankine dengan <i>Superheater</i>	13
<i>Gambar 2.6</i>	Skema Siklus Rankine dengan <i>Superheater</i> dan <i>Reheater</i>	14
<i>Gambar 2.7</i>	Diagram T-s Siklus Rankine dengan <i>Superheater</i> dan <i>Reheater</i>	14
<i>Gambar 2.8</i>	Diagram Siklus Stirling.....	15
<i>Gambar 2.9</i>	Skema dan Siklus Rankine Dengan <i>Open Feed Water Heater</i>	17
<i>Gambar 2.10</i>	Skema dan Siklus Rankine Dengan <i>Closed Feed Water Heater Cascaded Backward</i>	17
<i>Gambar 2.11</i>	Skema dan Siklus Rankine Dengan <i>Closed Feed Water Heater Pumped Forward</i>	19
<i>Gambar 3.1</i>	Skema instalasi PLTU Paiton Unit 5.....	26
<i>Gambar 3.2</i>	Skema <i>water steam cycle</i> PLTU Paiton Unit 5	27
<i>Gambar 3.3</i>	Skema aliran <i>flue gas</i> PLTU Paiton Unit 5	28
<i>Gambar 3.4</i>	Skema Komponen untuk Penghitungan Nilai <i>Heat Rate</i>	29
<i>Gambar 3.5</i>	Rancangan Diagram T-s Sistem Tenaga Uap	31
<i>Gambar 3.6</i>	Langkah Analisa Kinerja PLTU Paiton Unt 5 pada <i>Load 100%</i>	33
<i>Gambar 4.1</i>	Grafik Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap <i>Heat Rate</i> Sistem Tenaga Uap Pada <i>100% Load</i>	48
<i>Gambar 4.2</i>	Grafik Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Efisiensi <i>Thermal</i> Sistem Tenaga Uap Pada <i>100% Load</i>	50
<i>Gambar 4.3</i>	Grafik Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Temperatur <i>Main Steam</i> yang Dihasilkan Pada <i>100% Load</i>	51
<i>Gambar 4.4</i>	Grafik Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan <i>Feed Water Heater</i> Terhadap Temperatur <i>Flue Gas</i> Keluar Boiler Pada <i>100% Load</i>	53



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	<i>Paiton Unit 5 Plant Commisioning Heat Flow Diagram</i>
Lampiran 2	<i>Data Record DCS, FWH A8 Bypass 1 & 2</i>
Lampiran 3	<i>Data Record DCS, FWH A8 Bypass 3 & 4</i>
Lampiran 4	<i>Data Record DCS, FWH A8 Bypass 5 & 6</i>
Lampiran 5	<i>Data Record DCS, FWH A8 In Service 1 & 2</i>
Lampiran 6	<i>Data Record DCS, FWH A8 In Service 3 & 4</i>
Lampiran 7	<i>Data Record DCS, FWH A8 In Service 5 & 6</i>
Lampiran 8	Surat Ijin Pengambilan Data Skripsi



RINGKASAN

Ilham Baradaksa, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Penggunaan Jumlah Tingkat Feed Water Heater Terhadap Performance PLTU Paiton Unit 5*, Dosen Pembimbing : Lilis Yuliati dan Haslinda Kusumaningsih.

Kebutuhan listrik di Indonesia sangatlah besar, serta pertumbuhan kebutuhan listrik di Indonesia mencapai 7,2%. Pembangkit yang paling banyak diminati adalah PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Namun, dengan kebutuhan yang besar maka akan menimbulkan masalah baru yaitu kebutuhan batu bara yang besar juga. Sehingga performance PLTU harus bagus agar tidak muncul masalah tersebut. Salah satu cara untuk meningkatkan *performance* PLTU adalah menggunakan siklus *regenerative*. Seperti pemanfaatan *feed water heater* bertingkat yang digunakan untuk meningkatkan temperatur *feed water* sebelum memasuki boiler.

Penelitian dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Unit 5 PT. YTL JAWA TIMUR (Jawa Power). Penelitian meliputi 3 tahap, tahap pertama melakukan studi referensi sebagai penunjang data yaitu *manual book* dan *literature* yang ada di *document control* PT. YTL JAWA TIMUR. Tahap kedua, proses pengambilan *data record* operasi DCS (*Distributed Control System*) dari CCR (*Central Control Room*). Tahap ketiga, perhitungan matematis dengan prinsip termodinamika dan pembahasan dari perhitungan tersebut, sehingga nantinya didapatkan beberapa kesimpulan pengaruhnya terhadap nilai *heat rate*, nilai efisiensi unit, temperatur *main steam* (uap masuk HP turbin) dan temperatur *flue gas* keluar boiler pada PLTU Paiton unit 5 pada *Load* 100%.

Hasil penelitian di dapatkan bahwa penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat menurunkan nilai *heat rate* yang dibutuhkan. Dikarenakan temperatur *feed water* yang memasuki *economizer* lebih tinggi. Kemudian, penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai efisiensi yang dihasilkan. Karena penggunaan FWH 8 tingkat akan menyebabkan nilai *pinch point* mengecil, irreversibilitas yang terjadi juga semakin rendah. Selain itu, penggunaan *feed water heater* juga berpengaruh terhadap temperatur *main steam* dan *flue gas* yang akan berdampak pada beberapa komponen yang digunakan pada sistem tenaga uap.

Kata Kunci : *feed water heater*, PLTU, *performance*, *heat rate*, efisiensi

SUMMARY

Ilham Baradaksa, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2018, The Effect Of The Feed Water Heater Stage Number On The Performance Of Paiton Unit 5 Power Plant, Academic Supervisor: Lilis Yulianti and Haslinda Kusumaningsih.*

The demand of Electricity in Indonesia is very high, and the growth of electricity demand in Indonesia reaches 7.2%. The most popular power plant is Steam Power Plant, it will cause a new problem that is need for large coal as well. So the performance of Steam Power Plant should be good. One way to improve the performance of the steam power plant is to use the regenerative cycle. Such as the use of multistage feed water heaters that used to increase the temperature of feed water before entering the boiler. The purpose of the research is to analyzed the higher heat rate of steam powerplant so it can reduce the coal firing.

The research was conducted at Paiton Unit 5 Steam Power Plant PT. YTL JAWA TIMUR (JAWA POWER). Research includes 3 stages, the first stage of conducting a reference study as a supporting data that is manual book and literature in the document control PT. YTL JAWA TIMUR. The second stage, the process of retrieving data records DCS (Distributed Control System) from CCR (Central Control Room). Third stage is mathematical calculation with thermodynamic principle and discussion of the calculation, so that got the value of heat rate, unit efficiency, main steam temperature and flue gas temperature that out of boiler at PLTU Paiton unit 5 at Load 100%.

The results of the study found that the use of more FWH levels could decrease the heat rate required. Due to the temperature of feed waters entering the economizer is higher. Then, the use of a greater number of FWH levels can increase the value of the efficiency. Because the use of FWH 8 levels will cause pinch point value decreased, then the irreversibility number is also lower. In addition, the use of feed water heaters also affects the temperature of main steam and flue gas which will affects some of the components used in steam power systems.

Keywords : *feed water heater, steam powerplant, performance, heat rate, efficiency*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan jumlah penduduk sebesar 260.580.739, merupakan negara dengan jumlah penduduk terbanyak nomor 4 di dunia (CIA *World Factbook*, 2017). Tentu saja, hal ini akan sebanding dengan besarnya pasokan energi yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk Indonesia. Listrik adalah salah satu komponen penting dalam berjalannya roda kehidupan manusia. Segala aktifitas yang dilakukan oleh manusia membutuhkan listrik. Bahkan sudah banyak komponen atau mesin yang dulunya berbahan bakar fosil dikonversi menjadi listrik seperti mobil listrik. Listrik juga berperan dalam perekonomian dan sektor industri di Indonesia. Bahkan berbagai perusahaan maupun pabrik di Indonesia memiliki pembangkit listrik sendiri guna menekan *production cost* dari perusahaan maupun pabrik tersebut. Selain itu, untuk perusahaan seperti pabrik minyak kelapa sawit dan pertambangan yang terletak di daerah terpencil tentu mereka membutuhkan pembangkit listrik sendiri, karena tidak memungkinkan untuk membuat transmisi listrik dari PLN ke perusahaan-perusahaan tersebut. Laju pertumbuhan permintaan tenaga listrik rata-rata sebesar 7,2% atau 520 TWh per tahun selama periode 2015-2050 (*Outlook Energi Indonesia*, 2016).

Listrik dapat dibangkitkan dengan berbagai sumber daya, air (PLTA), uap (PLTU), nuklir (PLTN), diesel (PLTD), gas (PLTG), serta pembangkit listrik dengan menggunakan energi alternatif. Namun guna memenuhi kebutuhan daya yang besar, yang menjadi penyumbang terbesar adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hal ini dikarenakan PLTU mampu menghasilkan output daya sebesar 800 MW bahkan juga mampu menghasilkan sampai 1000 MW dalam 1 unit pembangkit saja. Menurut data *Outlook Energi Indonesia*, di Jawa Timur sendiri terdapat area sebagai pusat pembangkitan listrik yang dapat menyuplai 30-40% kebutuhan listrik Pulau Jawa, Madura dan Bali, yaitu PLTU Paiton. Jika ditotal dari 9 unit pembangkit yang ada di Paiton, seluruhnya mampu menghasilkan output hingga 4500 MW.

Dengan bentuk geografis yang berpulau-pulau dan mayoritas wilayahnya adalah lautan, tentu menjadi tantangan tersendiri bagi negara untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut. Dalam hal ini Perusahaan Listrik Negara (PLN) mengambil peran penuh dalam permasalahan ini. Salah satu solusi dari pemerintah adalah pada tahun 2014 Presiden Joko

Widodo mencanangkan program pembangunan pembangkit listrik sebesar 35.000 MW (Detik Finance, 2017), hal ini tentu bertujuan untuk mengatasi semakin besarnya kebutuhan energi listrik di Indonesia. Namun solusi tersebut tidak optimal apabila saat proses produksi berlangsung, *power plant* tidak memiliki *performance* yang bagus. Karena tentu saja dalam pengelolaannya haruslah memperhatikan berbagai aspek, salah satunya dalam dunia *engineer* kita pasti mengenal istilah efisiensi dan *heat rate*. Efisiensi adalah nilai perbandingan antara *energy output* dengan *energy input*. Sedangkan *heat rate* adalah besarnya nilai panas atau kalor yang diperlukan untuk menghasilkan (membangkitkan) listrik sebesar 1 kWh. Jadi apabila kita perhatikan keduanya memiliki definisi yang hampir sama.

Pada PLTU sendiri, *energy input* yang dihasilkan adalah berasal dari panas pembakaran batu bara di dalam boiler yang nantinya dipergunakan untuk merubah fase *feed water* menjadi *superheated steam*. Tentu saja dalam hal ini untuk menghasilkan listrik yang mencapai angka 500 MW/Unit maka akan diperlukan banyak sekali batu bara. Untuk itulah perlunya riset mengenai *power plant performance* khususnya pada aspek *heat rate* haruslah sering dilakukan seiring berkembangnya teknologi yang digunakan di PLTU itu sendiri. Salah satunya adalah sistem *regenerative* yang diterapkan seperti *feed water heater* bertingkat yang digunakan untuk meningkatkan temperatur *feed water* sebelum memasuki *boiler*. Sehingga dapat mengurangi panas yang dibutuhkan di dalam *boiler* karena *feed water* yang memasuki *boiler* temperaturnya sudah tinggi. *Feed water heater* adalah salah satu aplikasi dari salah satu mesin *heat exchanger*. Panas yang dimiliki *feed water heater* berasal dari ekstraksi atau pengambilan sedikit massa alir *steam* dari beberapa *stage* rangkaian turbin yang digunakan di dalam pembangkit.

Menurut Rizky (2015) dalam penelitiannya menyatakan semakin banyak uap yang di ekstraksi akan menurunkan energi untuk memutar turbin pada tingkat selanjutnya karena uap yang digunakan turbin berkurang. Namun apabila sama sekali tidak menggunakan *feed water heater* efisiensi sistem akan sangat buruk. Sehingga ada titik optimal jumlah ekstraksi yang dilakukan untuk mendapatkan nilai efisiensi terbaik.

Tentu saja, nantinya jumlah *feed water heater* yang digunakan akan mempengaruhi jumlah ekstraksi *steam* dan akan berpengaruh terhadap nilai *heat rate* dari *power plant* tersebut. Semakin tinggi nilai *heat rate* dari sebuah *power plant* berarti kebutuhan *input* energi untuk membangkitkan 1 kWh listrik akan semakin besar pula. Dalam hal ini, batu bara yang harus disiapkan oleh pembangkit tersebut juga harus besar. Karena itulah penelitian saya dapat membantu *power plant* untuk menjaga nilai *performance* nya.

Performance dari *power plant* haruslah dijaga paling tidak mendekati dengan *performance* pada saat *commissioning plant*. Sehingga *power plant* dapat menghasilkan listrik dengan pasokan batu bara yang lebih hemat.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan melihat latar belakang di atas, maka dapat ditentukan rumusan masalah penelitian sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh *feed water heater A8 in service* dan *feed water heater A8 bypass* terhadap nilai *heat rate* dan efisiensi unit pada PLTU Paiton unit 5 pada *load 100%*?
2. Bagaimana pengaruh *feed water heater A8 in service* dan *feed water heater A8 bypass* terhadap temperatur *main steam* yang masuk HP turbin dan temperatur *flue gas* keluar *boiler* pada PLTU Paiton unit 5 pada *load 100%*?

1.3 Batasan Masalah

Supaya permasalahan yang kami teliti tidak melebar, maka dalam tulisan ini perlu adanya batasan masalah sebagai berikut.

1. Pengambilan data aktual (*existing*) hanya dilakukan pada unit 5
2. Sistem beroperasi dalam kondisi *steady*
3. Efisiensi sistem tenaga uap yang dianalisis adalah efisiensi termal

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang kami lakukan adalah:

1. Dapat mengetahui pengaruh *feed water heater A8 in service* dan *feed water heater A8 bypass* terhadap nilai *heat rate* dan efisiensi unit pada PLTU Paiton unit 5 pada *load 100%*.
2. Dapat mengetahui pengaruh *feed water heater A8 in service* dan *feed water heater A8 bypass* terhadap temperatur *main steam* yang masuk HP turbin dan temperatur *flue gas* keluar *boiler* pada PLTU Paiton unit 5 pada *load 100%*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari penelitian kami sebagai berikut.

1. Memberikan pengetahuan baru mengenai ilmu proses dan *performance* di dunia industri khususnya pembangkit listrik tenaga uap.

2. Memberikan ilmu pengetahuan mengenai *power plant heat rate* dan siklus *regenerative* untuk meningkatkan efisiensi *power plant*.
3. Dapat digunakan sebagai acuan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap untuk melakukan *performance plant improvement*.
4. Dapat digunakan pihak perusahaan pembangkit listrik tenaga uap itu sendiri sebagai pertimbangan dalam penggunaan jumlah tingkat *feed water heater*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

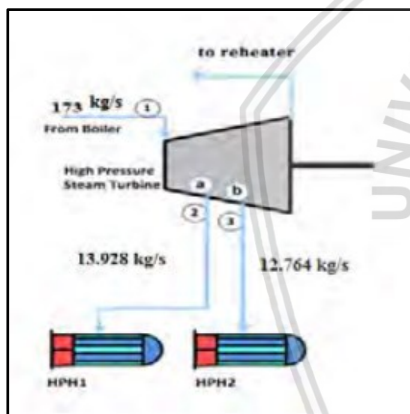
Penelitian mengenai pengaruh penggunaan siklus *regenerative* seperti *feed water heater* telah banyak dilakukan. Pada tulisan ini, saya menggunakan beberapa diantaranya sebagai pendukung Analisis-*analisis* perhitungan serta analisis-*analisis* pengaruh penggunaan jumlah tingkat *feed water heater*.

Sahid (2016) melakukan penelitian mengenai perhitungan *heat rate* PLTU Paiton Unit 9 berdasarkan *performance test* tiap bulan dari bulan November 2014 hingga Maret 2015 dengan beban 100% yaitu sebesar 659 MW. *Heat rate* adalah ukuran keandalan dari suatu unit pembangkit untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Dari hasil tersebut didapatkan *heat rate* terendah (terbaik) yaitu 2.500,811 kcal/kWh terjadi pada tanggal 13 Januari 2015. Sedangkan *heat rate* tertinggi terjadi pada tanggal 11 Desember 2014 yaitu sebesar 2.658,098 kcal/kWh. Dalam penelitian ini menyimpulkan untuk mendapatkan nilai *heat rate* terbaik dibutuhkan keandalan yang terkendali baik secara pengoperasian maupun perawatan antara turbin, *boiler* dan *transformator* serta menggunakan bahan bakar dengan nilai kalori yang tinggi.

Nurmalita (2012) melakukan penelitian mengenai analisis efisiensi energi pada PLTU PT. Energi Alam Raya Semesta di Kabupaten Nagan Raya, Nangroe Aceh Darussalam dan menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja masing-masing komponen pada sistem PLTU tersebut. Analisis efisiensi pada PLTU Energi Alam Raya Semesta dengan bahan bakar batu bara ini dibatasi hanya pada peralatan utama seperti *boiler*, turbin dan generator. Peralatan pendukung tidak dihitung karena menurut pengamatan di lapangan peralatan pendukung tidak terlalu mempengaruhi nilai efisiensi suatu sistem PLTU. Untuk memproduksi listrik 10 MWh, dibutuhkan 11.19 ton/h batubara, tetapi dalam kondisi aktual batu bara yang di suplai sebanyak 12 ton/h pada kadar air 43%. Jika kadar air dalam batu bara menurun sampai kadar air 15-20 %, hanya dibutuhkan 6,20 ton batu bara per jam. Pembakaran pada ruang bakar tidak sempurna. Hal ini timbul dari kekurangan udara atau kelebihan bahan bakar dan pendistribusian bahan bakar yang kurang efektif. Secara keseluruhan diperoleh efisiensi total pemanfaatan energi (*steam*) untuk PLTU Energi Alam Raya Semesta adalah 18%. Hal ini terjadi karena energi (*steam*)

yang dihasilkan hanya digunakan untuk memproduksi listrik saja, karena tidak ada industri yang memanfaatkan *steam* sehingga *steam* terkondensasikan kembali menjadi air.

Rizky Yusuf (2015) melakukan penelitian mengenai analisis termodinamika pengaruh aliran massa ekstraksi turbin uap bagian *High Pressure* untuk *feed water heater* terhadap performa PLTU di PT. PJB Gresik dengan *output* sebesar 200 MW. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mencari tahu pengaruh besaran aliran massa ekstraksi turbin uap yang akan digunakan untuk *feed water heater* pada pembangkit tenaga uap terhadap performa pembangkit secara keseluruhan. Pengaruh variasi jumlah ekstraksi aliran massa uap terhadap performa pembangkit adalah apabila ekstraksi uap untuk HP *Heater* 1 tidak terlalu berdampak, untuk HP *Heater* 2 banyak berdampak *heat rate* naik (buruk) karena bahan bakar yang diperlukan lebih banyak untuk memanaskan air menjadi uap walaupun daya yang dihasilkan tinggi, berikut skema ekstraksi dari penelitian tersebut.

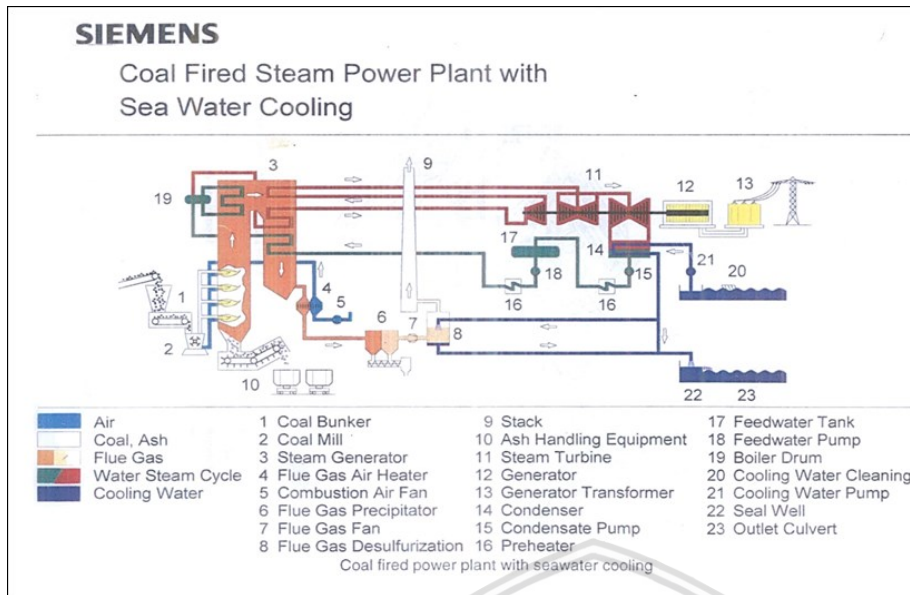


Gambar 2.1 Ekstraksi uap dari HP Turbin
Sumber: Rizki Yusuf (2015, p.23)

2.2 Sistem Tenaga Uap

Siklus adalah suatu proses dimana suatu keadaan atau kondisi kemudian dapat kembali lagi ke keadaan atau kondisi semula dan terjadi secara berulang-ulang (Cengel *et.al*, 2006). Salah satu aplikasi yang sering kita temui adalah pembangkit listrik tenaga uap. Pada suatu sistem tenaga uap fluida akan diberikan proses yang nantinya membentuk suatu siklus, biasanya yang digunakan sebagai fluida kerja adalah air. Air nantinya akan diberikan beberapa proses seperti pemanasan, penguapan, pendinginan, ekspansi dan kompresi. Komponen utama pada sistem tenaga uap adalah *boiler*, turbin, *condensor* dan pompa. Namun pada aplikasinya, akan dipasangkan berbagai komponen yang berguna untuk meningkatkan *performance* atau kerja yang dihasilkan suatu pembangkit listrik tenaga uap.





Gambar 2.2 Skema instalasi PLTU Paiton unit 5 (PT. YTL Jawa Power)
Sumber: PT. YTL Siemens Plant Course (2016)

Prinsip kerja PLTU Paiton unit 5 dan 6 secara umum adalah pembakaran batu bara pada *boiler* untuk memanaskan air dan mengubah air tersebut menjadi uap yang sangat panas yang digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan tenaga listrik dari kumparan medan magnet di generator.

Batu bara sebagai bahan bakar utama pada proses pembakaran, disamping itu oksigen dengan konsentrasi tertentu juga diperlukan. Panas dari hasil pembakaran digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Uap inilah yang digunakan untuk menggerakkan turbin yang akan menghasilkan energi mekanis untuk menggerakkan *generator*.

Air dalam *boiler* berasal dari air laut yang melewati berbagai macam proses di *Water Treatment Plant* (WTP) hingga menjadi air demin. Air yang berasal dari WTP pertama kali disuplai ke *hotwell* di dalam *condensor*. Dengan menggunakan *Condensor Extraction Pump* air dipindahkan ke *deaerator* melalui *heater A1*, *heater A2*, *heater A3*, dan *heater A4*. Di *deaerator* kadar oksigen terlarut dikurangi agar tidak terlalu banyak terjadi oksidasi. Karena bila terjadi oksidasi maka pipa akan mudah terkorosi dan dapat mengakibatkan kebocoran. Air yang telah dikurangi kadar oksigennya kemudian ditampung di *feed water storage tank* lalu dipindahkan ke *economizer* melalui *heater A6*, *heater A7*, dan *heater A8* dengan *Boiler Feedwater Pump*. Di *economizer* air mendapatkan pemanasan dari furnace pertama kali walaupun sebelumnya telah mendapatkan pemanasan beberapa kali dari *heater*, kemudian air masuk di *steam drum* lalu bercampur dengan uap. Di *steam drum*, bagian yang masih berupa air akan dipanaskan kembali oleh *evaporator* dan bagian yang sudah berupa *steam* akan dipanaskan di *superheater*. Di *superheater*

inilah pemanasan utama karena pipa-pipa *boiler* bersentuhan langsung dengan api (suhu *steam* ditingkatkan sampai sekitar 500°C).

Menurut El-Wakil (1984), perpindahan kalor dari gas pembakaran ke air di dalam pipa berlangsung melalui radiasi dan konveksi. Karakteristik gas pembakaran tergantung pada bahan bakar yang dipakai, proses pembakaran, rasio udara/bahan bakar. Gas ini akan memancarkan semua panjang gelombang dan akan mempunyai radiasi yang kuat jika dalam proses pembakaran itu terdapat bahan-bahan butiran seperti jelaga, hal ini akan terjadi jika menggunakan batu bara atau minyak.

Energi radiasi yang dipancarkan oleh gas pembakaran bergantung pada suhu gas (pangkat empat), tekanan bagian masing-masing penyusun gas radiasi, bentuk dan ukuran gas itu, serta seberapa dekat terhadap benda yang menyerap panas. Bagian perpindahan kalor melalui konveksi jauh lebih kecil dari bagian radiasi karena radiasi disebabkan oleh sejumlah gas yang tebal sedangkan konveksi hanya terjadi di dekat permukaan pipa. Kalor yang diterima dinding pipa dikonduksi ke seluruh permukaan pipa kemudian di konveksikan ke campuran uap dua fase di dalam pipa melalui perpindahan kalor.

Bila *steam* yang dihasilkan sudah menjadi *superheated* maka *steam* akan langsung menuju *High Pressure Turbine* (HP Turbin), namun jika kualitas *steam* masih kurang maka *steam* akan dilewatkan pada HP *bypass*. Apabila *steam* yang dimasukkan pada HP Turbin masih belum bagus maka akan merusak sudu-sudu turbin. *Steam* yang keluar setelah memutar HP Turbin dipanaskan lagi di *boiler* melewati *Reheater*. *Steam* yang dipanaskan di *reheater* tidak sepanas *steam* yang dihasilkan *superheater*.

Kemudian *steam* akan menuju *Intermediate Pressure Turbin* (IP Turbin) untuk menggerakkan IP Turbin. Setelah dari IP Turbin *steam* langsung menuju *Low Pressure Turbine* (LP Turbin) tanpa pemanasan kembali. Lalu *steam* keluar menuju *condensor* untuk dikondensasikan. Air hasil kondensasi dipompakan kembali dan seterusnya. Pada waktu *steam* memutar turbin maka poros turbin juga akan ikut berputar (poros HP Turbin, IP Turbin, dan LP Turbin menyatu). Dari putaran poros inilah yang digunakan untuk memutar generator dengan putaran yang konstan (3000 RPM) dan energi listrik sudah dapat dibangkitkan.

Setelah LP Turbin diputar *steam* kemudian *steam* akan mengalir menuju *Condensor* untuk didinginkan dan berubah menjadi air. *Condensor* ada dua yaitu A dan B yang letaknya dibawah LP Turbin A dan B. Proses yang terjadi *steam* bersentuhan langsung dengan pipa yang di dalamnya dialiri pendingin berupa air laut. Kondensasi ini mengubah

steam menjadi air yang kemudian ditampung di *Condensate Hot Well*. Setelah mencapai titik ini, air siap digunakan kembali untuk mengulang siklus dari sistem tenaga uap.

2.3 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus ideal untuk sistem tenaga uap pada pembangkit listrik. Siklus Rankine yang ideal mengabaikan factor irreversibilitas yang terjadi. Siklus Rankine terdiri dari empat proses berikut

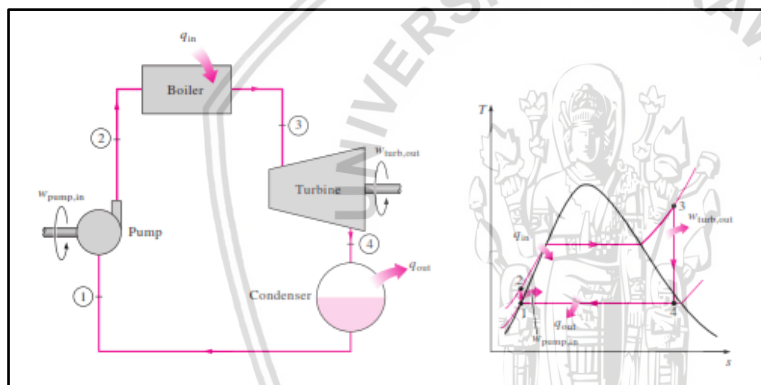
1-2 Kompresi *isentropic* dalam pompa

2-3 Pemanasan uap pada tekanan konstan (*isobaric*) dalam *boiler*

3-4 Ekspansi *isentropic* dalam turbin

4-1 Pelepasan panas pada tekanan konstan (*isobaric*) dalam *condensor*

(Cengel *et.al*, 2006).



Gambar 2.3 Siklus Rankine Ideal
Sumber: Cengel *et.al* (2006, p.553)

Air memasuki pompa pada *state* 1 dalam kondisi cair jenuh dan dikompresi hingga mencapai tekanan kerja *boiler* dengan kondisi isentropis. Pada *state* 2 air masuk ke dalam *boiler* dalam kondisi cair terkompresi (*compressed liquid*). Uap akan keluar dari *boiler* dalam kondisi uap panas lanjut (*superheated*) pada *state* 3. Pada dasarnya peran *boiler* disini adalah sebagai mesin penukar panas dalam jumlah yang besar, dimana panas dari gas pembakaran, reaktor nuklir atau yang lainnya di transfer ke dalam air di dalam pipa-pipa *boiler*. Panas yang berasal dari gas pembakaran di transfer ke air pada dasarnya terjadi pada tekanan yang konstan.

Uap *superheated* pada *state* 3 mulai memasuki turbin untuk di ekspansi kan secara *isentropic* dan menghasilkan kerja dengan memutar poros yang terhubung ke generator. Proses ekspansi dan konversi energi akan selesai pada *state* 4 dimana uap memasuki *condensor*. Dalam hal ini, biasanya kondisi uap sudah campuran cair-uap jenuh dengan

nilai fraksi(x) yang tinggi. Uap akan dikondensasikan pada tekanan yang konstan di *condensor*, biasanya *condensor* membuang panas ke media pendingin seperti air danau, air sungai ataupun dilepas ke atmosfer. Setelah itu, uap akan meninggalkan *condensor* dalam kondisi cair jenuh dan memasuki pompa untuk kembali memulai siklus (Cengel *et.al*, 2006).

Area dibawah kurva proses diagram T-s merupakan proses perpindahan panas untuk kondisi *reversible* internal, kita lihat juga bahwa daerah di bawah kurva proses 2-3 mewakili panas yang ditransfer ke air umpan di *Boiler* dan area dibawah kurva proses 4-1 mewakili panas yang dilepas di *condensor*. Perbedaan antara kedua garis tersebut (area yang diliputi oleh kurva siklus) adalah hasil kerja bersih yang dihasilkan selama siklus.

Pada Analisis siklus Rankine ideal, kondisinya dianggap *steady flow* dikarenakan aliran fluida kerja pada seluruh komponennya dianggap konstan. Perubahan energi kinetik dan potensial uap dapat diabaikan karena biasanya besar perubahannya relatif kecil. Dalam hal ini didapatkan persamaan 2.1 :

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{in} - h_{out} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Komponen-komponen yang melibatkan kerja diantaranya adalah pompa dan turbin, pompa membutuhkan kerja dan turbin menghasilkan kerja. Sedangkan pada *boiler* dan *condensor* tidak melibatkan kerja, keduanya hanya menerima dan melepas panas. Sehingga untuk setiap komponennya didapatkan persamaan 2.2 hingga persamaan 2.6 :

$$\text{Pompa (q = 0)} \quad w_{p, in} = h_2 - h_1 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{atau } w_{p, in} = v(P_2 - P_1) \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Boiler (w = 0)} \quad q_{in} = h_3 - h_2 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{Turbin (q = 0)} \quad w_{t, out} = h_3 - h_4 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{Kondensor (w = 0)} \quad q_{out} = h_4 - h_1 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

h = entalpi fluida (kJ/kg)

v = volume spesifik fluida (m³/kg)

P = tekanan fluida (Pa)

Sehingga untuk menghitung efisiensi *thermal* siklus Rankine dapat diketahui pada persamaan 2.7 hingga persamaan 2.9 :



$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{w_{t,out} - w_{p,in}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

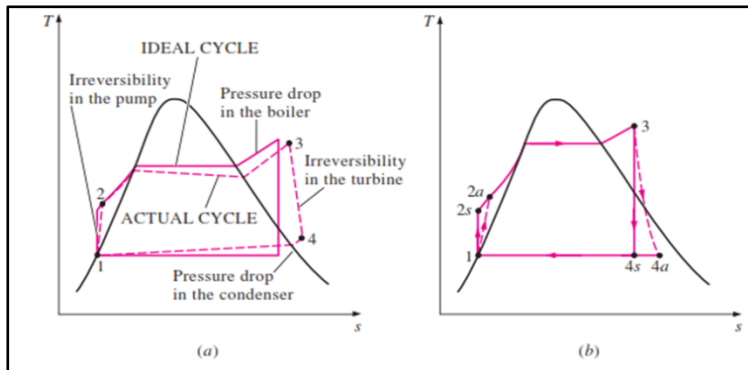
$$w_{net} = q_{in} - q_{out} = w_{t,out} - w_{p,in} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

2.3.1 Siklus Rankine Aktual

Siklus Rankine Aktual berbeda dengan siklus Rankine Ideal, hal ini dikarenakan adanya irreversibilitas pada tiap komponen maupun lintasan yang dilalui fluida sepanjang siklus. Pada siklus Rankine ideal irreversibilitas diabaikan sehingga nilainya ideal. Konsep *reversibility* dikenalkan oleh Sadi Carnot pada tahun 1824. Proses *reversible* atau proses ideal adalah proses yang mampu balik ke keadaan awalnya dengan lintasan yang sama persis dengan proses sebelumnya dan menyerap/melepas energi panas dan kerja yang dipertukarkan dalam proses sebelumnya. Jika hal-hal tadi tidak terpenuhi atau dengan kata lain tidak tercapai maka keadaan tersebut dinamakan *irreversibility*. Terdapat 2 macam irreversibilitas yaitu irreversibilitas eksternal dan irreversibilitas internal (Cengel *et.al*, 2006). Irreversibilitas eksternal adalah irreversibilitas yang terjadi melintasi batas sistem. Sumber utamanya adalah *heat transfer* dan gesekan. Contohnya perbedaan temperatur pada reservoir suhu panas dan reservoir suhu rendah, gesekan bantalan dengan poros turbin, poros pompa, poros generator dan lain-lain.

Irreversibilitas internal adalah irreversibilitas yang terjadi di dalam batas sistem. Sumber utamanya adalah gesekan antar fluida di sepanjang lintasan. Irreversibilitas internal akan mengakibatkan *pressure drop* pada *boiler*, *condensor*, *feedwater heater*, katup, bengkokan dan pipa-pipa di sepanjang lintasan. Saat keluar dari *boiler* tekanan uap yang dihasilkan akan menurun, tentu saja juga akan berpengaruh pada saat uap memasuki turbin sehingga kerja yang dihasilkan turbin menjadi tidak maksimal. Hal ini tentu saja dapat menimbulkan efisiensi komponen pada sistem tenaga uap menurun. Sehingga cairan meninggalkan pompa harus berada pada tekanan yang lebih tinggi dari pada yang masuk turbin karena adanya *pressure drop* yang terjadi (El-Wakil, 1984).

Berikut adalah penggambaran terjadinya irreversibilitas dalam sistem tenaga uap, garis putus-putus menandakan terjadinya pergeseran garis siklus dari yang seharusnya (ideal).



Gambar 2.4 a). Pergeseran siklus daya uap aktual dari siklus Rankine yang ideal.
 b). Pengaruh pompa dan ireversibilitas turbin pada siklus Rankine yang ideal.
 Sumber: Cengel *et.al* (2006, p.558)

Pada gambar dapat kita lihat terjadi kenaikan entropi di titik 2a dan 4a, peningkatan entropi dalam turbin dan pompa akan menimbulkan kenaikan suhu. Jadi perbandingan nilai kerja ideal dan kerja nyata / aktual disebut efisiensi isentropis atau efisiensi politropik. Untuk menghitung efisiensi pompa dan turbin dapat diketahui dengan persamaan 2.10 dan persamaan 2.11:

$$\eta_p = \frac{ws}{wa} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (2.10)$$

$$\eta_T = \frac{wa}{ws} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.11)$$

Dimana :

h = entalpi fluida (kJ/kg)

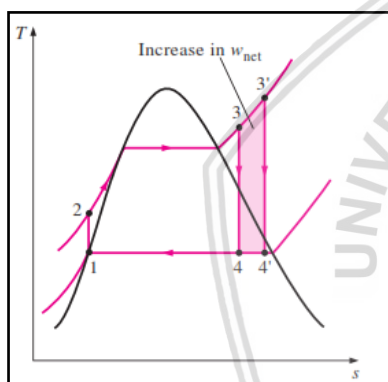
Faktor lain yang juga harus diperhatikan dalam siklus daya adalah pada *condensor*, biasanya fluida pendingin di subkulasi untuk mencegegah kavitasi di awal, penguapan cepat dan kondensasi pada tekanan rendah sampai sisi impeller pompa, yang mungkin dapat merusak pompa. Lalu, uap yang bocor selama siklus dan udara yang bocor juga akan merugikan sehingga harus diperhatikan kebutuhan *steam* dan udara dengan mengontrol massa alir yang masuk ke dalam sistem.

2.3.2 Siklus Rankine Hingga Panas Lanjut

Pada siklus ini akan ditambahkan komponen di dalam *boiler* yaitu *superheater*. *Superheater* terletak di bagian atas *boiler* atau lebih tepatnya setelah pipa-pipa *evaporator*. *Superheater* berfungsi menyerap panas dari gas pembakaran untuk menciptakan *steam* hingga fase *superheated* (uap panas lanjut). Uap panas lanjut akan memungkinkan penambahan panas pada suhu rata-rata yang lebih tinggi dari pada hanya menggunakan uap

jenuh. Dengan demikian uap panas lanjut dapat memperbaiki efisiensi termal siklus serta memperbaiki irreversibilitas. Dapat memperbaiki irreversibilitas disini dikarenakan *superheater* semakin menurunkan selisih suhu antara fluida kerja (*steam*) dengan fluida pemanas (gas pembakaran di dalam *boiler*). Ditambah lagi uap panas lanjut menghasilkan satu efek yang menguntungkan, yaitu uap yang lebih kering. Sehingga turbin yang bekerja pada tingkat kelembapan rendah akan lebih efisien dan tidak mudah mengalami kerusakan sudu (El-Wakil, 1984).

Dari gambar 2.4 dapat kita lihat efek *superheating* pada kurva proses 3-3' menunjukkan peningkatan nilai kalor masuk pada *boiler* dan pada daerah yang berwarna, sehingga total area dibawah kurva proses 3-3' menunjukkan terjadi penambahan kerja bersih pada turbin.



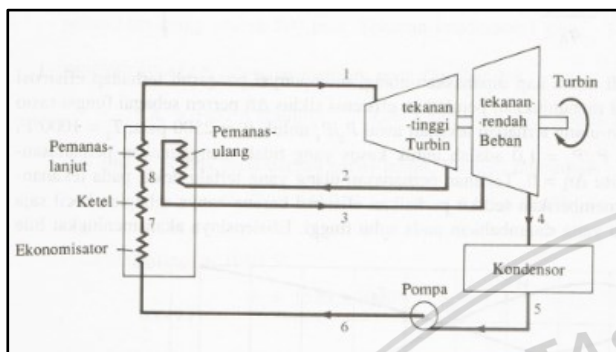
Gambar 2.5 Siklus Rankine dengan *Superheater*
Sumber: Cengel *et.al* (2006, p.561)

2.3.3 Siklus Rankine dengan Pemanasan Ulang

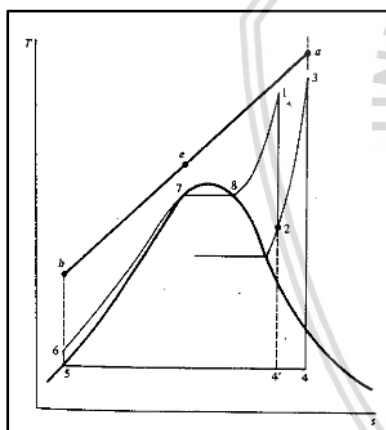
Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi siklus Rankine adalah menggunakan *reheater*. *Reheater* terletak di sisi atas *boiler* setelah pipa-pipa *superheater* dan sebelum *economizer*. Pada gambar 2.6 dan 2.7 ditunjukkan diagram alir sederhana dan diagram T-s suatu siklus Rankine reversibel (menggunakan turbin yang adiabatik dan pompa tanpa terjadi penurunan tekanan) dengan tambahan pemanasan sampai uap panas lanjut dan pemanasan ulang.

Pada siklus *reheating*, uap pada titik 1 di ekspansikan pada turbin bertekanan tinggi sampai pada titik 2. Sesudah itu, dikembalikan ke *boiler (reheater)* dimana uap akan dipanaskan kembali pada tekanan konstan sampai suhu mendekati suhu saat di titik 1. Uap hot reheat lalu diekspansikan pada turbin bertekanan rendah sampai tekanannya sama dengan tekanan *condensor*.

Sebagaimana dapat dilihat, dengan *reheater* kalor ditambahkan dua kali dari 6 ke 1 dan 2 ke 3, dengan demikian terjadi peningkatan suhu rata-rata di *boiler*. Ini menyebabkan uap pada bagian *superheater* dan *reheater* dari 7 ke 3 tetap dekat dengan garis fluida pemanas pada garis ae, sehingga mengakibatkan peningkatan efisiensi siklus. *Reheating* juga akan menyebabkan uap pada sisi keluar turbin menjadi lebih kering.



Gambar 2.6 : Skema Siklus Rankine dengan *Superheater* dan *Reheater*
 Sumber : Pudjanarso, Astu (2013, p151)



Gambar 2.7 Diagram T-s Siklus Rankine dengan *Superheater* dan *Reheater*
 Sumber: Pudjanarso, Astu (2013, p151)

Berikut Analisis perhitungan efisiensi siklus Rankine dengan *reheater* :

$$W_T = (h_1 - h_4) + (h_3 - h_4) \dots \dots \dots (2.12)$$

$$W_P = (h_6 - h_5) \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\Delta W_{net} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5) \text{ (kJ/kg)} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$q_A = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2) \text{ (kJ/kg)} \dots \dots \dots (2.15)$$

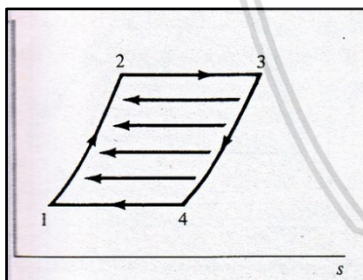
$$\eta_{th} = \frac{\Delta W_{net}}{q_A} (\%) \dots \dots \dots (2.16)$$

2.4 Siklus Rankine dengan Regenerasi

Perbedaan temperatur antara fluida kerja dan fluida pemanas yang jauh didalam *boiler* akan meningkatkan terjadinya reversibilitas eksternal. Hal ini dapat diatasi dengan proses regenerasi, dimana kalor dipertukarkan antara fluida yang ekspansi di dalam turbin dan fluida terkompresi sebelum masuk *boiler* untuk proses penambahan kalor utama. Fluida yang sedang berekspansi di dalam turbin di tapping (diambil sebagian pada *stage* tertentu) sehingga massa alir uap masuk dan keluar turbin mengalami penurunan. Tujuannya adalah mencari cara untuk menaikkan suhu air yang meninggalkan pompa (*feedwater*) sebelum memasuki *boiler* (El-Wakil, 1984).

Perangkat yang ditambahkan untuk melakukan regenerasi di dalam sistem tenaga uap adalah regenerator atau dalam hal ini adalah pemanas air umpan (FWH). *Feedwater Heater* pada dasarnya adalah *heat exchanger* dimana panas ditransfer uap ke air umpan baik dengan mencampur (*Open Feedwater Heater*) ataupun tanpa mencampurnya (*Closed Feedwater Heater*).

Regenerasi tidak hanya meningkatkan efisiensi siklus, namun juga memberi fasilitas sebagai sarana deaerasi air umpan. Deaerasi digunakan untuk menghilangkan kandungan gas-gas terlarut (oksigen, karbon dioksida) dalam air umpan karena gas-gas ini akan menyebabkan korosi di dalam sistem ketel uap (Cengel *et.al*, 2006). Siklus regenerasi dapat dilihat pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Diagram Siklus Stirling
Sumber: El-Wakil (1984, p.42)

2.5 Feed Water Heater

Ireversibilitas akan mengurangi nilai efisiensi siklus tenaga uap. Salah satu usaha untuk mengurangi adalah memakai siklus regenerasi. Siklus regenerasi dilakukan dengan cara menukar panas uap ekspansi dengan air umpan. Dengan tujuan menurunkan nilai *pinch point* (beda temperatur terkecil antara fluida pemanas dan fluida kerja). Pemanasan air umpan dilakukan di dalam *feed water heater*, biasanya dilakukan beberapa langkah bertingkat namun tidak secara kontinu. Biasanya pada instalasi tenaga uap *feed water*

heater yang digunakan antara lima dan delapan tahapan. Tidak ada sistem instalasi pada dewasa ini yang sama sekali tidak memakai *feedwater heater*. Ada tiga jenis *feed water heater* yang biasa digunakan, yaitu :

1. Jenis terbuka (kontak langsung)
2. Jenis tertutup dengan kurasan mundur bertingkat (*cascaded backward*)
3. Jenis tertutup dengan kurasan dipompa maju (*pumped forward*)

(El-Wakil, 1984).

2.5.1 *Open (Direct Contact) Feed Water Heater*

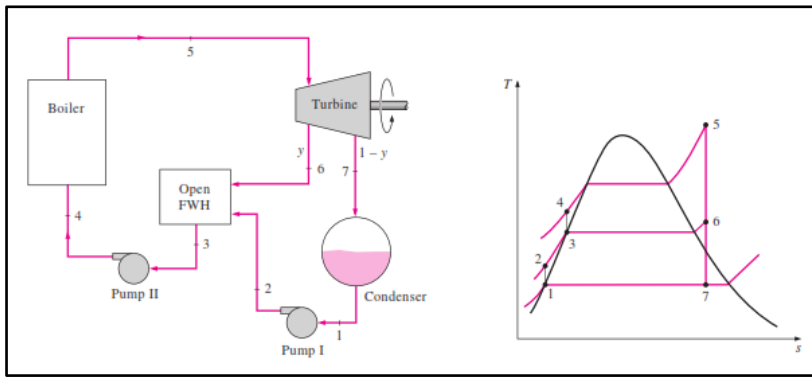
Pemanas air umpan terbuka (atau kontak langsung) pada dasarnya adalah ruang pencampuran, dimana uap diekstraksi dari campuran turbin dengan air umpan keluar dari pompa, campuran tersebut meninggalkan pemanas sebagai cairan jenuh pada tekanan *feed water*. Pada gambar 2.9, uap memasuki turbin di tekanan *boiler* (titik 5) dan berekspansi secara isentropis ke tekanan menengah. Beberapa uap diekstraksi pada keadaan ini dan diarahkan ke pemanas air umpan, sedangkan uap yang tersisa terus berekspansi secara isentropis ke tekanan kondensor (titik 7). Uap ini meninggalkan kondensor dalam fase cair jenuh pada tekanan kondensor (titik 1), pada titik ini disebut *feed water*, kemudian memasuki pompa isentropik, di mana ia dikompres ke tekanan pemanas air umpan (titik 2) dan dialirkan ke pemanas air umpan, dimana *feed water* dicampur dengan uap yang diekstraksi dari turbin. Fraksi uap yang diekstraksi sedemikian sehingga campuran tersebut meninggalkan pemanas sebagai cairan jenuh pada tekanan pemanas (titik 3). *Feed water* kemudian keluar lalu ditekan sampai tekanan *boiler* (titik 4). Siklus selesai dengan memanaskan air dalam *boiler* hingga memasuki turbin (titik 5). Dalam analisis jumlah uap yang diekstraksi dinyatakan per satuan massa. Untuk setiap 1 kg uap yang meninggalkan *boiler* , sebagian (y kg) uap diekstraksi pada titik 6. Sisanya ($1-y$ kg) berekspansi sepenuhnya sampai tekanan kondensor. Skema dan siklus Rankine dengan *feed water heater* terbuka adalah sebagai berikut :

$$q_{in} = h_5 - h_4 \dots\dots\dots (2.17)$$

$$q_{out} = (1 - y)(h_7 - h_1) \dots\dots\dots (2.18)$$

$$w_{T, out} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \dots\dots\dots (2.19)$$

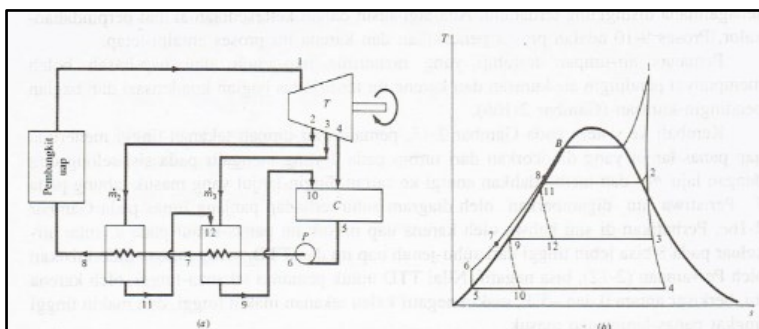
$$w_p = (1 - y)w_{p1} + w_{p2} \dots\dots\dots (2.20)$$



Gambar 2.9 Skema dan Siklus Rankine Dengan *Open Feed Water Heater*
Sumber: Cengel *et.al* (2006, p.569)

2.5.2 *Closed Feed Water Heater Cascaded Backward*

Pemanas air umpan ini adalah jenis yang paling sederhana dan paling banyak digunakan dalam sistem pembangkit daya. Biasanya pemanas air umpan ini menggunakan *heat exchanger* berjenis *shell and tubes* dan memakai aliran berlawanan arah (*counter flow*). Dalam pemanas tertutup, air umpan dilewatkan melalui *tubes* dan uap ekstraksi berada pada *shell* untuk memberikan energinya kepada air umpan, lalu uap menjadi terkondensasi. Uap yang telah digunakan energinya untuk memanskan feedwater dan mengembun disebut *drain*. Pada dasarnya pemanas air umpan adalah kondensor kecil yang beroperasi pada tekanan lebih tinggi dari kondensor utama pada sistem tenaga uap. Karena air umpan tidak bercampur langsung dengan uap, air umpan hanya diberi tekanan sekali saja oleh pompa kondensat yang sekaligus menjadi pompa untuk pemanas air umpan. Namun terkadang juga ada yang mempunyai satu pompa kondensat dan satu pompa pemanas air umpan yang dipasang di awalan supaya kenaikan tekanan yang dibebankan pada masing-masing pompa tidak terlalu besar. Pompa pemanas air umpan akan pasti diperlukan setelah pemanas *deaerator* apabila instalasi menggunakan pemanas deaerasi.



Gambar 2.10 Skema dan Siklus Rankine Dengan *Closed Feed Water Heater Cascaded Backward*

Sumber: El-Wakil (1984, p.47)

Pada gambar 2.9 ditunjukkan suatu skema sederhana dan diagram T-s siklus Rankine non-ideal. Pada contoh sistem tersebut memakai 2 pemanas, satu pompa bertugas untuk memompa kondensat sehingga mampu untuk melalui dua pemanas air umpan dan memasuki *boiler* pada titik 8. Uap yang sudah terkondensasi tentu tidak bisa dibiarkan mengumpul disitu dan harus diumpankan kembali ke dalam siklus. Untuk jenis *cascaded backward* ini *drain* diumpankan kembali ke pemanas air umpan yang tekanannya setingkat lebih rendah dan memindahkan energinya ke air umpan yang masih dingin. Sedangkan untuk *drain* dari pemanas air umpan tingkat pertama akan diumpankan kembali ke kondensor. Maka dari itulah pemanas ini dinamakan *cascaded* (berjenjang). *Drain* dari pemanas bertekanan rendah pada gambar 2.9 akan dialirkan ke kondensor dan masuk sebagai fase campuran pada titik 10. Proses ini dinamakan *throtling*, *throtling* adalah proses penurunan tekanan (ekspansi) tanpa merubah nilai enthalpy. Pemanas air umpan dengan tekanan lebih tinggi akan menerima ekstraksi dari turbin pada titik 2 dengan laju \dot{m}_2 dan memindahkan energinya pada air umpan titik 7. *Drain* pada titik 11 dialirkan ke pemanas air umpan bertekanan lebih rendah pada titik 12 (gabungan $\dot{m}_2 + \dot{m}_3$), setelah itu *drain* dikembalikan ke dalam kondensor.

Kesetimbangan massa sesuai dengan sistem instalasi *Closed Feed Water Heater Cascaded Backward* adalah :

$$\begin{aligned} \text{Aliran massa antara 1 dan 2} &= 1 \\ \text{Aliran massa antara 2 dan 3} &= 1 - \dot{m}_2 \\ \text{Aliran massa antara 3 dan 10} &= 1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \\ \text{Aliran massa antara 10 dan 1} &= 1 \\ \text{Aliran massa antara 2 dan 12} &= \dot{m}_2 \\ \text{Aliran massa antara 3 dan 12} &= \dot{m}_3 \\ \text{Aliran massa antara 12 dan 10} &= \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \end{aligned}$$

Kesetimbangan energi pada pemanas tekanan tinggi dan pemanas tekanan rendah ditunjukkan pada persamaan 2.22 dan persamaan 2.23 :

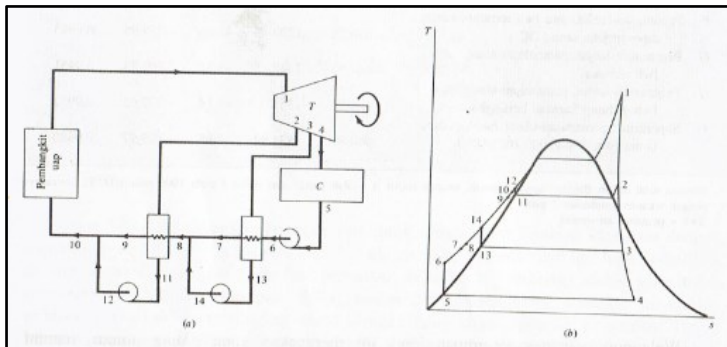
$$\dot{m}_2(h_2 - h_{11}) = h_8 - h_7 \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\dot{m}_3(h_3 - h_9) + \dot{m}_2(h_{12} - h_9) = h_7 - h_6 \dots\dots\dots (2.22)$$

2.5.3 *Closed Feed Water Heater Pumped Forward*

Sebagaimana dengan pemanas air umpan jenis tertutup sebelumnya, pemanas ini juga memakai *heat exchanger shell and tubes*. *Drain* dari sistem ini dipompakan maju ke

saluran air umpan utama. Pada gambar 2.10 terlihat skema sederhana dan diagram T-s dengan dua pemanas.



Gambar 2.11 Skema dan Siklus Rankine Dengan *Closed Feed Water Heater Pumped Forward*

Sumber : El-Wakil (1984, p.52)

Pemanas air umpan ini dapat meniadakan proses *throttling* tetapi sistem harus menambahkan sebuah pompa kecil untuk masing-masing pemanas. Bedanya dengan sistem terbuka, pompa yang digunakan disini lebih kecil, hanya membawa sedikit aliran yaitu yang berasal dari $\dot{m}_2 + \dot{m}_3$. Berawal dari pemanas tekanan rendah, *drain* pada titik 13 dipompa maju ke saluran air umpan utama pada titik 14, lalu bercampur dengan air keluar dari pemanas pada titik 7, sehingga menghasilkan campuran pada titik 8. Titik 8 lebih dekat pada titik 7 daripada titik 14 di diagram T-s karena aliran air umpan utama pada titik 7 lebih besar daripada aliran *drain* \dot{m}_3 . Air pada titik 8 masuk pemanas bertekanan tinggi dan dipanaskan hingga titik 9. *Drain* keluar dari pemanas pada titik 11 lalu dipompa maju ke titik 12 dan bercampur dengan air umpan utama pada titik 9, sehingga menghasilkan aliran air umpan penuh pada titik 10 yang kemudian masuk ke *boiler*.

Kesetimbangan massa sesuai dengan sistem instalasi *closed feed water heater pumped forward* adalah :

Aliran massa antara 1 dan 2	= 1
Aliran massa antara 2 dan 12	= \dot{m}_2
Aliran massa antara 2 dan 3	= $1 - \dot{m}_2$
Aliran massa antara 3 dan 14	= \dot{m}_3
Aliran massa antara 3 dan 7	= $1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3$
Aliran massa pada titik 14	= \dot{m}_3
Aliran massa antara 8 dan 9	= $1 - \dot{m}_2$
Aliran massa pada titik 12	= \dot{m}_2

Aliran massa antara 10 dan 1 = 1

Kesetimbangan energi pada pemanas tekanan tinggi dan pemanas tekanan rendah ditunjukkan pada persamaan 2.23 dan persamaan 2.24 :

$$\dot{m}_2(h_2 - h_{11}) = (1 - \dot{m}_2)(h_9 - h_8) \dots \dots \dots (2.23)$$

$$\dot{m}_3(h_3 - h_{13}) = (1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_7 - h_6) \dots \dots \dots (2.24)$$

2.6 Performance Sistem Tenaga Uap

2.6.1 Heat Rate

Heat rate atau laju panas adalah nilai kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh listrik. Biasanya dalam satuan energi atau kerja (kJ/kWh) atau (Btu/kWh). Di dalam industri pembangkitan listrik, para *engineer* dan operator biasanya lebih sering menggunakan nilai efisiensi sebagai ukuran ekonomi dari sistem instalasi daya. Karena mempengaruhi biaya investasi, biaya bahan bakar dan biaya operasi (El-Wakil, 1984). Maka dari itulah nilai *heat rate* lebih sering digunakan apabila terdapat perubahan atau *improvement* di dalam siklus sistem. *Heat rate* dapat dihitung dengan persamaan 2.25 :

$$HR = \frac{\text{kalor yang ditambahkan pada steam}}{\text{daya output}}$$

$$HR = \frac{Q_{in}}{W_{out}} \left(\frac{\frac{kJ}{s}}{kW} \right) = \frac{kJ}{s.kW} \times \frac{3600s}{3600s} = \frac{Q_{in}.3600}{W_{out}} \left(\frac{kJ}{kWh} \right) \dots \dots \dots (2.25)$$

- Dimana :
- HR = *heat rate* (kJ/kWh)
 - Q_{in} = kalor yang ditambahkan (kJ/s)
 - W_{out} = *Actual Load Output* Unit 5 (kWh)

2.6.2 Efisiensi Thermal

Efisiensi *thermal* adalah nilai perbandingan antara kerja bersih yang dihasilkan dengan kalor yang ditambahkan pada siklus atau instalasi-daya (El-Wakil, 1984). Efisiensi *thermal* siklus Rankine dapat diketahui dengan persamaan 2.26 dan 2.27.

$$\eta_{th} = \frac{\text{daya output}}{\text{kalor yang ditambahkan pada steam}}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{w_T - w_P}{q_{in}} \dots \dots \dots (2.26)$$

$$\eta_{th} = \frac{1}{3600.HR} \left(\frac{1}{\left(\frac{kJ}{kWh}\right)} \right) = \left(\frac{1}{\frac{kJ}{kW.3600s}} \right) = \left(\frac{kW.3600s}{kJ} \right) \times \left(\frac{1}{3600} \right) = \left(\frac{kJ}{kJ} \right) = (\%)$$

.....(2.27)

Keterangan :

HR = *heat rate* (kJ/kWh)

η_{th} = efisiensi termal (%)

Q_{in} = kalor yang ditambahkan (kJ/s)

W_T = kerja turbin (kJ/s)

W_P = kerja pompa (kJ/s)

Pada analisis ini persamaan efisiensi thermal yang digunakan adalah persamaan 2.27. Persamaan 2.27 digunakan karena acuan yang digunakan dalam analisis *performance* adalah *heat rate* yang dibutuhkan. Persamaan 2.26 tidak digunakan karena harus memperhitungkan kerja pompa-pompa dan kerja bersih yang dihasilkan seluruh turbin. Sehingga pada hal ini akan didapatkan nilai efisiensi yang langsung berhubungan dengan panas dari *boiler (heat rate)*.

2.7 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dibahas diketahui bahwa terdapat hubungan antara pengaruh jumlah tingkat *Feedwater Heater* terhadap *performance* sistem tenaga uap. Pada saat *Feedwater Heater A8 in service* (8 tingkat pemanasan) nilai *performance* (*Heat rate* dan Efisiensi Unit) akan lebih tinggi dari pada saat *Feedwater Heater A8 bypass* (7 tingkat pemanasan). Hal ini dikarenakan pada saat FWH A8 di *bypass* temperatur *feedwater* yang masuk kedalam *economizer* jauh lebih rendah dari pada saat FWH A8 *in service*. Hal ini menyebabkan kalor yang dibutuhkan *boiler* untuk memanaskan juga mengalami peningkatan. Jadi semakin banyak jumlah tingkat *Feedwater Heater* yang digunakan kalor yang dibutuhkan *boiler* akan semakin rendah, dan *heat rate* nya semakin rendah.



BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang diterapkan adalah metode penelitian pengolahan data dengan menerapkan prinsip termodinamika. Biasanya, penelitian jenis ini digunakan untuk menguji dampak dari suatu perubahan atau peningkatan (*improvement plant*) terhadap performa kerja atau efisiensi suatu sistem dalam industri. Dalam hal ini nanti akan dibandingkan antara *feed water heater A8 in service* dan *feed water heater A8 bypass*. Setelah itu, di analisis pengaruhnya terhadap nilai *heat rate*, nilai efisiensi unit, temperatur *main steam* (masuk HP turbin) dan *temperatur flue gas* keluar *boiler* pada PLTU Paiton unit 5 pada *load* 100%. Lalu kita bandingkan dengan kondisi saat *commissioning plant*.

Penelitian dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Unit 5 PT. YTL JAWA TIMUR (Jawa Power). Penelitian meliputi 3 tahap, tahap pertama melakukan studi referensi sebagai penunjang data yaitu *manual book* dan *literature* yang ada di *document control* PT YTL JAWA TIMUR. Tahap kedua, proses pengambilan *data record* operasi DCS (*Distributed Control System*) dari CCR (*Central Control Room*) serta pengambilan data dari *commissioning record performance* dengan bantuan para pembimbing dari *Turbine Section Engineer*. Data yang dicatat berupa *properties* (temperature fluida, *pressure* fluida, massa alir fluida) dan *load* dari unit tersebut. Tahap ketiga, perhitungan matematis dengan prinsip termodinamika dan pembahasan dari perhitungan tersebut, sehingga nantinya didapatkan beberapa kesimpulan pengaruhnya terhadap nilai *heat rate*, nilai efisiensi unit, temperatur *main steam* (uap masuk *HP turbine*) dan temperatur *flue gas* keluar *boiler* pada PLTU Paiton unit 5 pada *load* 100%.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dan analisis dilaksanakan selama bulan Januari 2018 sampai dengan Mei 2018 di Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Pengambilan data dilaksanakan di PT. YTL JAWA TIMUR (Jawa Power) PLTU Paiton Unit 5, Probolinggo, Jawa Timur pada bulan Januari 2018 sampai Februari 2018.

3.2 Variabel Penelitian

Penelitian adalah proses analisis sistematis yang meliputi pengumpulan data pengolahan data dan akan menghasilkan suatu hasil ataupun sebuah kesimpulan dengan

berdasarkan metode ilmiah yang berlaku pada periode waktu tertentu. Dalam kegiatan tersebut terdapat faktor-faktor yang akan saling mempengaruhi satu sama lain yaitu disebut variabel penelitian. Identifikasi variabel-variabel penelitian bertujuan untuk mendapatkan karakteristik dan pengaruh terhadap suatu masalah atau objek penelitian. Adapun variabel penelitian dapat dibagi menjadi variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang kita variasikan dan diubah yang menyebabkan perubahan pada variabel lain dan variabel bebas tidak tergantung dengan variabel yang lain. Pada penelitian ini, diteliti pengaruh antara *Feed Water Heater A8 in service* dan *Feed Water Heater A8 bypass*. Sehingga jumlah tingkat *Feed Water Heater* akan menjadi variabel bebas karena pada saat *A8 in service* jumlah tingkat *Feed Water Heater* adalah 8 tingkat, sedangkan pada saat *A8 bypass* jumlah tingkat *Feed Water Heater* adalah 7 tingkat.

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nantinya nilainya akan terpengaruh variabel lain dalam hal ini adalah variabel bebas. Pada penelitian ini diteliti pengaruh antara *Feed Water Heater A8 in service* dan *Feed Water Heater A8 bypass*, nantinya variabel terikat pada penelitian ini adalah *properties* dari *steam* pada masing-masing titik berdasarkan siklus Rankine nya. Serta pengaruhnya terhadap nilai *heat rate*, nilai efisiensi unit, temperatur *main steam* (masuk HP turbin) dan temperatur *flue gas keluar boiler* pada PLTU Paiton Unit 5 pada *load* 100%.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang sudah ditentukan oleh peneliti untuk dijaga konstan atau dengan kata lain tetap. Sehingga dapat diasumsikan bahwa hanya variabel bebas yang mempengaruhi variabel terikat karena variabel lain dapat dikendalikan dan dijaga tetap. Pada penelitian ini faktor-faktor yang dikontrol antara lain:

1. Seluruh data diambil pada kondisi 100% *load*.
2. Seluruh data diambil pada kondisi *load* konstan.
3. Seluruh data diambil pada satu waktu (jam) yang sama.
4. Batubara yang digunakan pada unit 5 adalah kombinasi 50% Lati dan 50% Kideco.

3.3 Skema Instalasi dan Spesifikasi Alat

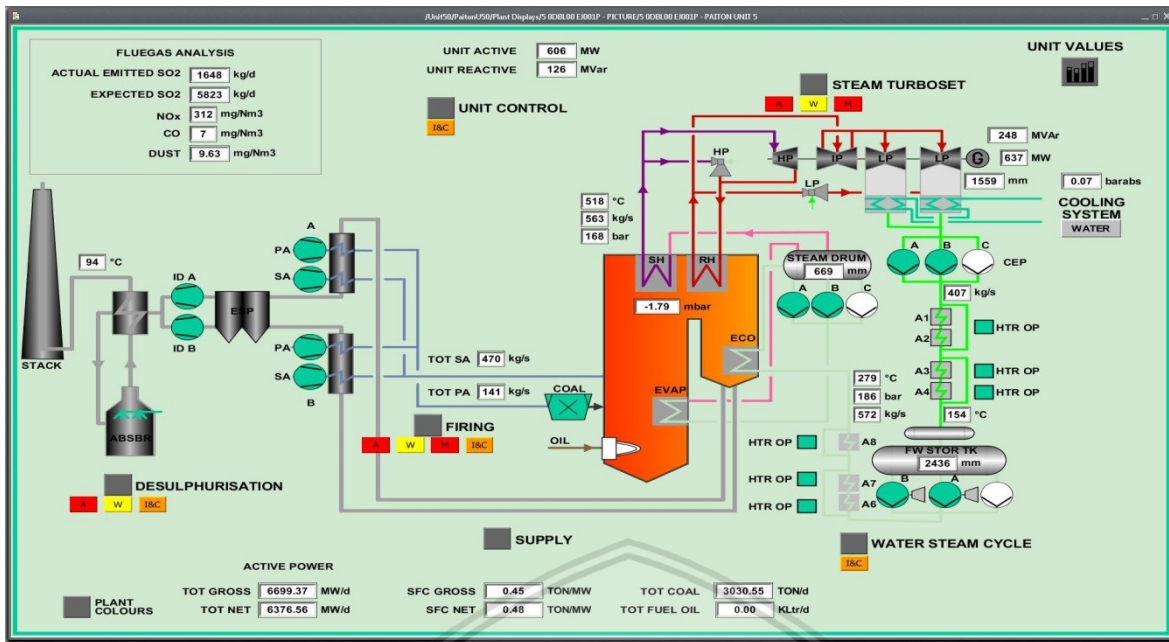
Skema yang pertama adalah skema mengenai instalasi seluruh komponen pembangkit listrik tenaga uap di PLTU Paiton Unit 5 (PT. YTL Jawa Power). Di dalam skema ini terbagi menjadi tiga siklus utama yaitu :

1. Siklus udara dan bahan bakar pada *boiler*.
2. Siklus air uap (*water steam cycle*).
3. Siklus gas hasil pembakaran (*flue gas*).

Untuk udara pembakaran didapatkan dari udara di lingkungan yang dialirkan memakai *Forced Draft Fan (FD Fan)*. Setelah itu udara dilewatkan ke *Gas Air Heater* untuk dipanaskan memanfaatkan panas dari *flue gas boiler*. Udara dibagi menjadi dua, *primary air* dan *secondary air*. *Primary Air* adalah udara yang digunakan untuk mendorong butiran batu bara yang telah ditumbuk oleh *Pulverizer Mill* untuk dimasukkan kedalam *boiler* untuk dilakukan proses pembakaran. Sedangkan *secondary air* adalah udara yang digunakan langsung untuk reaksi pembakaran di dalam *boiler*. Untuk batu bara di suplai oleh 6 *pulverizer mill* yang sudah dibagi load untuk masing-masing sesuai dengan kebutuhan.

Berikut adalah siklus dari instalasi utama PLTU Paiton Unit 5 :

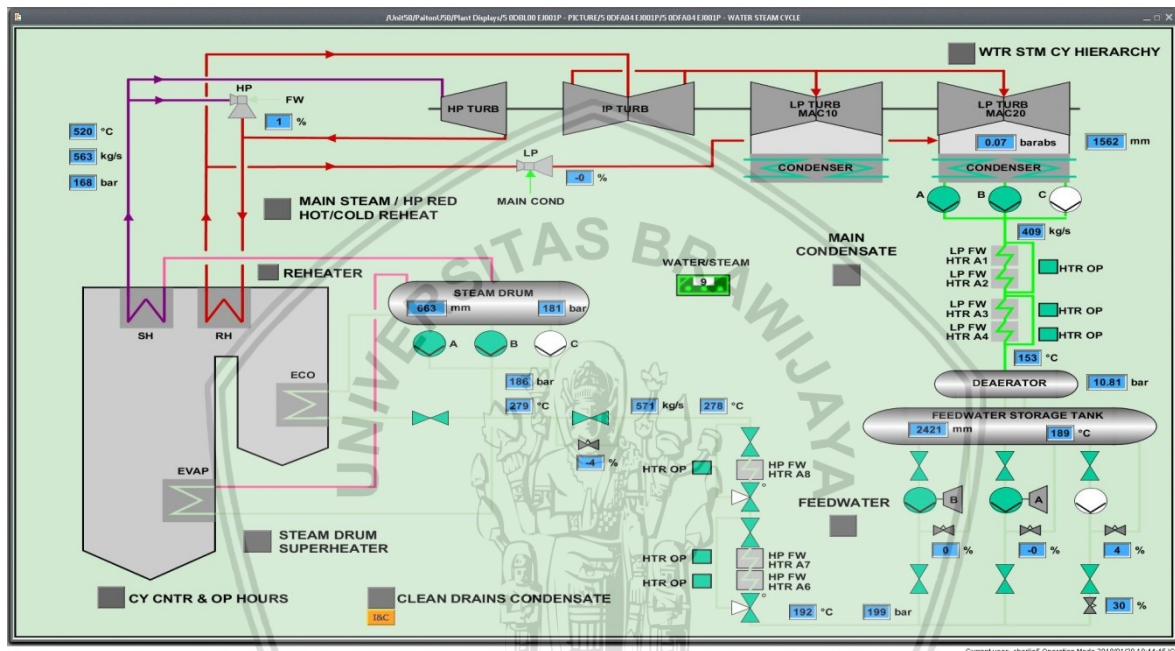
- Kapasitas : 2 X 610 MW
- Produksi : ABB C-E (1998)
- Kapasitas *Steam* : 564kg/s (*S/H Steam*)
- Tipe *Boiler* : *Forced Circulation, Balance Draft, Pulverized Coal*
- Sistem Perapian : *Tangential Firing, Low NOx Burner*
- Tekanan *Superheated Steam* : 175 bar
- Temperatur *Main Steam* : 540°C
- Temperatur *Reheat Steam* : 540°C
- Jumlah *Mill & Coal Bunker* : 6



Gambar 3.1 Skema instalasi PLTU Paiton Unit 5

Untuk *feed water*, pertama uap yang telah dikondensasikan di dalam kondensator akan dipompa oleh *Condensat Extraction Pump (CEP)*. Lalu kondensat akan dipanaskan di *feed water heater 1 (FWH A1)*, *feed water heater 2 (FWH A2)*, *feed water heater 3 (FWH A3)* dan *feed water heater 4 (FWH A4)*. Setelah itu dimasukkan kedalam *feed water tank* namun terlebih dahulu dilewatkan pada *deaerator* yang terletak tepat diatas *feed water tank*. Setelah ditampung sementara oleh *feed water tank*, *feed water* dipompa oleh *feed water pump*. *Feed water pump* disini digerakkan oleh turbin yang memanfaatkan uap ekstraksi untuk penggerakannya, namanya *Turbine Feed Water Pump (TFWP)*. Pompa *feed water* ini mampu memompa air dari tekanan 10 bar menjadi 190-200 bar karena selain memiliki rpm yang tinggi dia juga memiliki bilah yang bertingkat atau *Multistage Centrifugal Pump*. Lalu *feed water* akan dipanaskan melalui *Feed Water Heater 6 (FWH A6)*, *Feed Water Heater 7 (FWH A7)* dan *Feed Water Heater 8 (FWH A8)*. Lalu *feed water* akan dipanaskan oleh *economizer* di dalam *boiler* dan ditampung di dalam *steam drum*. Pada kondisi ini *feed water* telah dirubah menjadi *steam*. Setelah itu, *steam* akan dipompa oleh *Boiler Water Circulating Pump (BWCP)* dan dimasukkan ke dalam *evaporator* dan dikembalikan kedalam *steam drum*. Untuk *steam* yang sudah menjadi uap murni akan naik keatas dan dipanaskan di dalam *superheater* untuk dirubah menjadi *superheated steam*. Sedangkan yang masih mengandung cair akan turun kembali ke dalam *evaporator*. Disini, uap sudah menjadi *main steam* yang siap diekspansikan di rangkaian turbin yang pertama, yaitu *High Pressure Turbine (HP Turbine)*. Setelah keluar *HP*

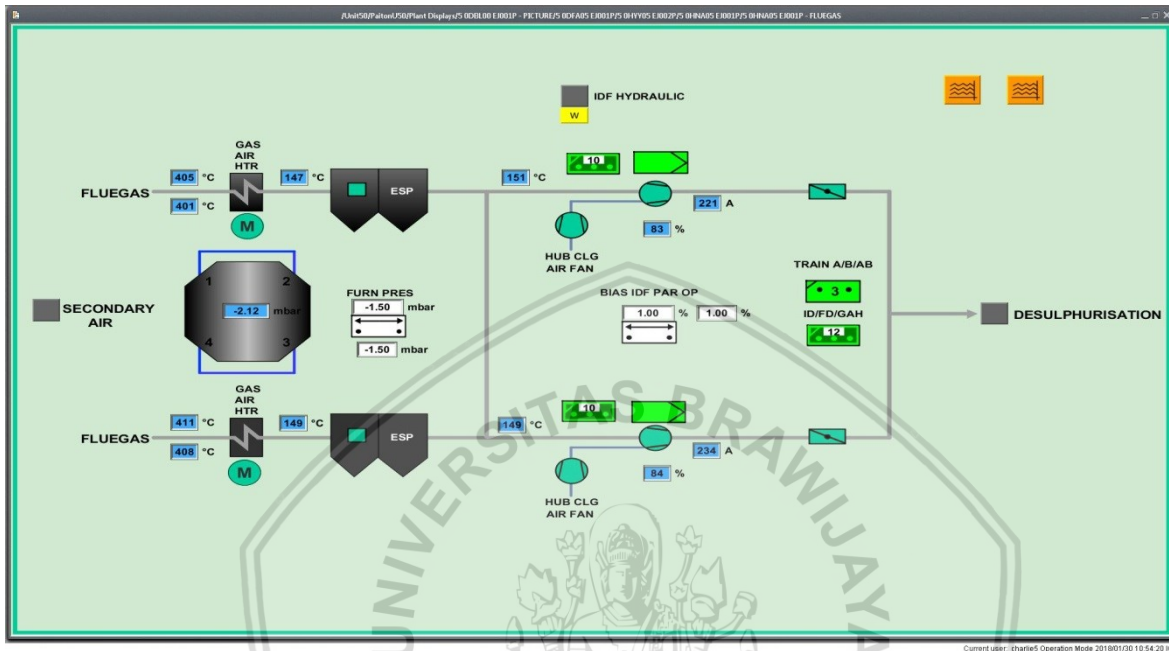
Turbine uap bernama *cold reheat steam* akan dipanaskan kembali didalam *boiler* tepatnya di dalam *reheater*, dan uap menjadi *hot reheat steam*. Setelah itu, uap siap diekspansikan di dalam *Intermediate Pressure Turbine (IP Turbine)* dan keluarannya langsung diarahkan untuk diekspansikan di dalam *Low Pressure Turbine (LP Turbine)*. Memanfaatkan tekanan *vacum* di dalam kondenser, uap keluaran *LP Turbine* akan langsung dihisap untuk dikondensasikan dan siap di siklus kan kembali. Berikut adalah skema dari siklus air uap PLTU Paiton Unit 5.



Gambar 3.2 Skema *water steam cycle* PLTU Paiton Unit 5

Terakhir adalah siklus dari gas buang hasil pembakaran di dalam *boiler*. Pertama, *flue gas* yang masih panas dilewatkan ke dalam *Gas Air Heater (GAH)*. Panas dari *flue gas* akan ditransferkan menuju udara (*primary* dan *secondary air*), hal ini salah satu pemanfaatan kalor yang terbuang oleh *flue gas*. Setelah itu, *flue gas* dilewatkan di dalam *Electro Static Presipitate (ESP)* yang berfungsi untuk menangkap debu yang berada pada udara sisa hasil pembakaran di *furnace*. Ini adalah upaya menghilangkan limbah debu (*dust*) dan gas-gas beracun yang ada pada *flue gas*. Lalu *flue gas* yang masih panas akan diambil panasnya kembali oleh komponen yang bernama *Gas-Gas Heater (GGH)*. *GGH* merupakan alat *heat exchanger* yang berfungsi untuk memanaskan udara yang telah melalui proses pada *flue gas desulphuration* agar udara tersebut menjadi kering. Kemudian, *flue gas* dilewatkan ke dalam *Flue Gas Desulphuration (FGD)* untuk dihilangkan kandungan sulfur yang masih terkandung. Lalu *flue gas* yang memiliki

kelembapan air yang cukup tinggi karena dilewatkan di dalam *FGD* akan dipanaskan oleh *Gas-Gas Heater (GGH)* sehingga *flue gas* menjadi lebih kering dan akhirnya *flue gas* kemudian dibuang melalu *stack*. Berikut adalah skema dari aliran *flue gas* PLTU Paiton Unit 5.



Gambar 3.3 Skema aliran *flue gas* PLTU Paiton Unit 5

3.4 Analisis dan Perhitungan *Performance* PLTU Paiton Unit 5

Analisis perubahan penggunaan jumlah tingkat *Feed Water Heater* diawali dengan melakukan analisis kinerja Unit 5 saat *Feed Water Heater A8 in service* terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan menganalisis kinerja Unit 5 saat *Feed Water Heater A8 bypass*, lalu dibandingkan dengan kondisi pada saat *commisioning plant*. Analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Pertama, kita melakukan pengambilan data aktual pada *DCS* PLTU Paiton Unit 5. *Properties* fluida meliputi tekanan, temperatur dan massa alir, namun tidak semua titik yang akan kita ambil, melainkan hanya titik yang berpengaruh terhadap *heat rate* dan efisiensi *boiler* saja. Pengambilan data yang diperlukan berupa :

1. *Properties Feedwater* masuk *Economizer*
2. *Properties Main Steam* masuk *HP Turbine*
3. *Properties Cold Reheat Steam* masuk *Reheater*
4. *Properties Hot Reheat Steam* masuk *IP Turbine*
5. *Properties Superheater & Reheater Spray*

6. Actual Load (100% Load)

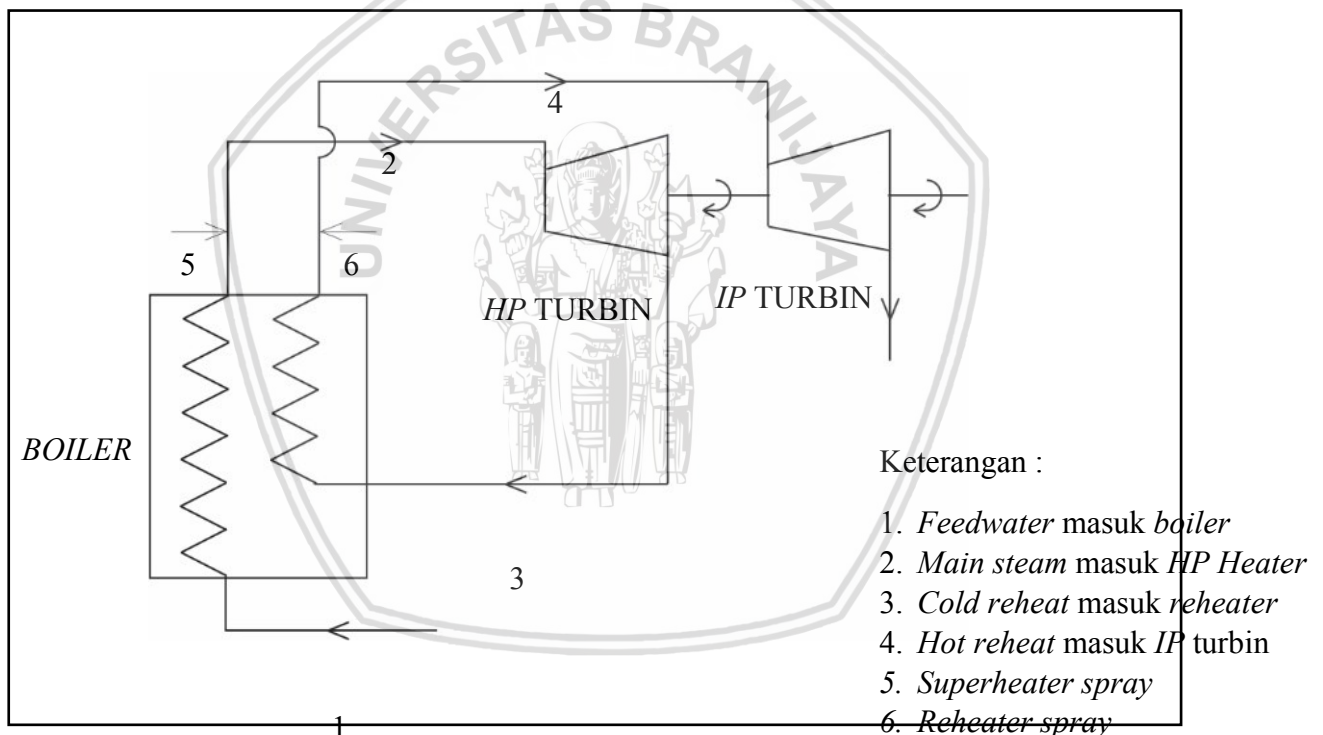
Kemudian, kita juga mengambil data temperatur fluida yang kita asumsikan akan terpengaruh oleh penggunaan *Feed Water Heater* A8, yaitu berupa :

1. Temperatur *main steam* yang masuk *HP turbine*.
2. Temperatur *flue gas* yang keluar dari *boiler*.

Selain itu, kita juga mengambil data *commisioning plant* untuk dibandingkan kondisi sekarang dengan kondisi saat pertama kali PLTU beroperasi. Kemudian berikut adalah proses perhitungan dari performance sistem tenaga uap :

I. Perhitungan *Heat Rate*

Jika digambarkan skema dari instalasi sistem tenaga uap yang digunakan untuk mencari nilai *heat rate* Unit 5 PLTU Paiton pada saat load 100% adalah sebagai berikut :



Gambar 3.4 Skema Komponen untuk Penghitungan Nilai *Heat Rate*

Perhitungan diawali dengan mencari enthalpy pada titik-titik yang sudah ditentukan. Untuk mengetahui nilai entalpi dan entropi dilakukan proses interpolasi sesuai data tekanan dan temperatur berdasarkan *Property Tables Cengel Thermodynamics*. Setelah didapatkan nilai entalpi dan entropi kemudian dilakukan proses perhitungan untuk mengetahui nilai energi yang masuk (Q_{in}) pada boiler dengan menggunakan persamaan kesetimbangan energi yang masuk (Q_{in}) merupakan jumlah energi yang masuk *economizer*

dan *superheater* dengan energi masuk pada *reheater*. Pada perhitungan energi panas yang masuk pada *economizer* diketahui nilai entalpi *feed water* (h_1) dan massa alir *feed water* (\dot{m}_1) selanjutnya pada *superheater* diketahui nilai entalpi *superheater spray* (h_5) dan massa alir *superheater spray* (\dot{m}_5) serta nilai entalpi *superheated steam* (h_2) dan untuk massa alir *superheated steam* merupakan jumlah massa alir *feed water* (\dot{m}_1) dan massa alir *superheater spray* (\dot{m}_5). Energi panas yang masuk pada *economizer* dan *superheater* dapat diketahui dari persamaan (3.1).

$$Q_{in\ 1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) + \dot{m}_5(h_2 - h_5) \dots\dots\dots (3.1)$$

Pada sisi *reheater* diketahui nilai entalpi *hot reheat steam* (h_4) dan massa alir *hot reheat steam* (\dot{m}_4) selanjutnya nilai entalpi *reheater spray* (h_6) dan massa alir *reheater spray* (\dot{m}_6) serta nilai entalpi *cold reheat steam* (h_3) dan massa alir *cold reheat steam* merupakan massa alir *hot reheat steam* (\dot{m}_4) dikurangi *reheater spray* (\dot{m}_6). Energi panas yang masuk pada sisi *reheater* ditunjukkan pada persamaan (3.2).

$$Q_{in\ 2} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_6) \cdot (h_4 - h_3) + \dot{m}_6(h_4 - h_6) \dots\dots\dots (3.2)$$

Sehingga besarnya nilai energi panas total yang masuk pada *boiler* dapat dihitung dengan persamaan (3.3).

$$Q_{in} = Q_{in\ 1} + Q_{in\ 2} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$= [(\dot{m}_1 + \dot{m}_5) \cdot (h_2 - (h_1 + h_5))] + [((\dot{m}_4 - \dot{m}_6) \cdot (h_4 - h_3)) + (\dot{m}_6(h_4 - h_6))]$$

Kemudian untuk menghitung nilai *Heat Rate* dapat menggunakan persamaan (2.28).

$$HR = \frac{3600 \cdot Q_{in}}{W_{out}} \left(\frac{kJ}{kWh} \right)$$

II. Perhitungan Efisiensi Unit

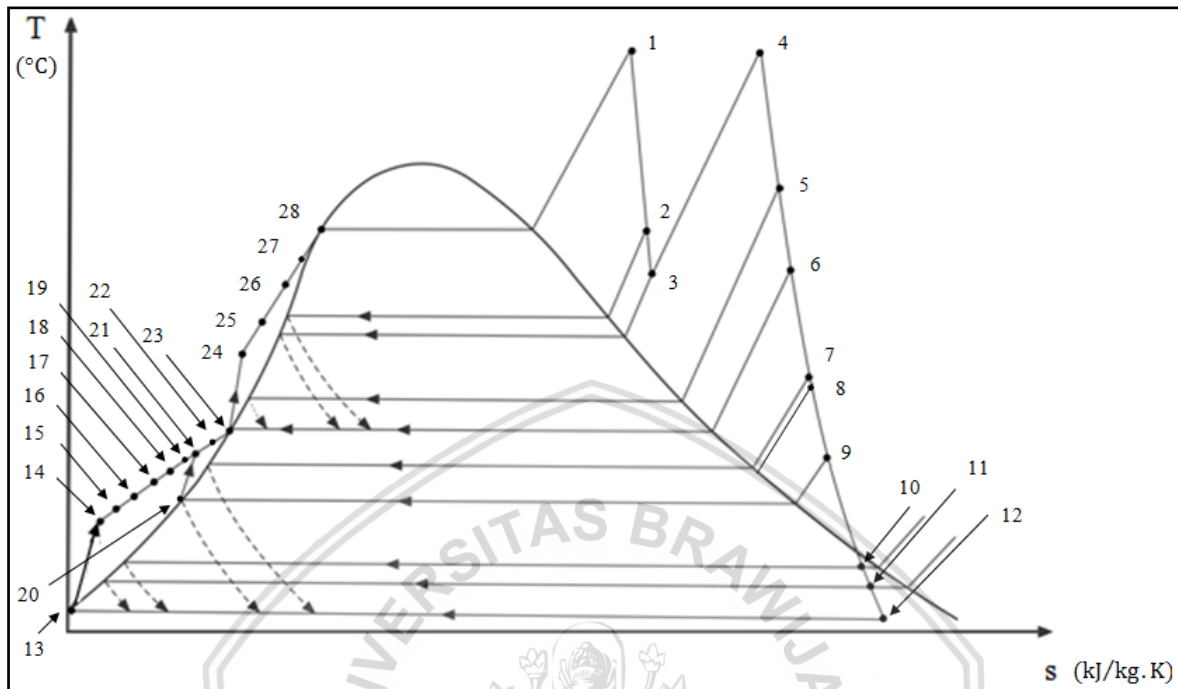
Karena nilai efisiensi = (1/HR) maka kita dapat menghitungnya menggunakan persamaan (2.29).

$$\eta_{th} = \frac{\text{daya output}}{\text{k calor yang ditambahkan pada steam}} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} (\%)$$



$$\eta_{th} = \frac{1}{3600.HR} \left(\frac{1}{\left(\frac{kJ}{kWh} \right)} \right) = \left(\frac{1}{\frac{kJ}{kW.3600s}} \right) = \left(\frac{kW.3600s}{kJ} \right) \times \left(\frac{1}{3600} \right) = \left(\frac{kJ}{kJ} \right) = (\%)$$

..... (2.29)



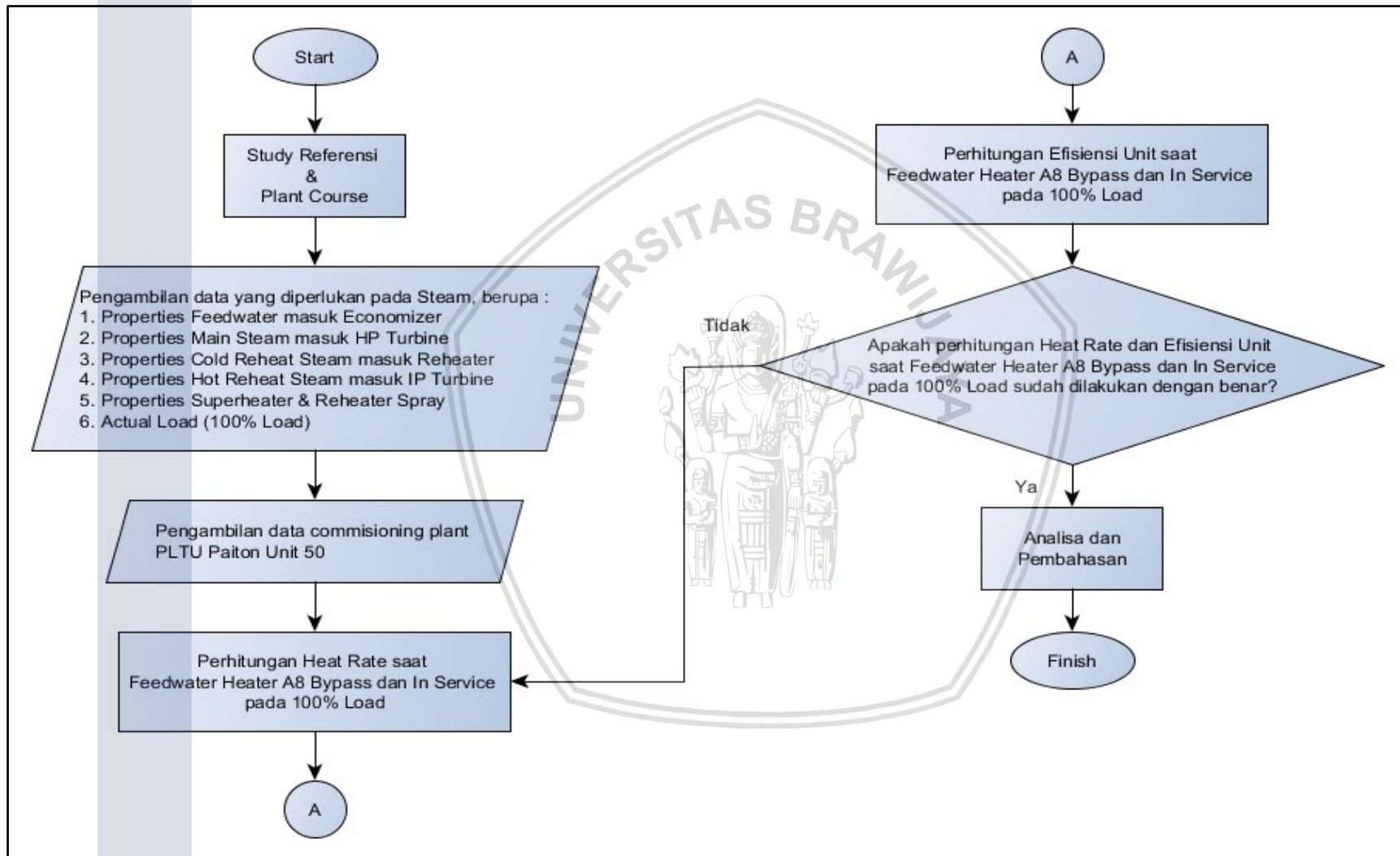
Gambar 3.5 Rancangan Diagram T-s Sistem Tenaga Uap

Keterangan :

1. *Inlet High Pressure Turbine dan outlet superheater*
2. *Ekstraksi A8*
3. *Ekstraksi A7, Outlet High Pressure Turbine dan inlet Reheater*
4. *Inlet Intermediate Pressure Turbine dan outlet Reheater*
5. *Ekstraksi A6*
6. *Ekstraksi A5*
7. *Ekstraksi A4*
8. *Outlet Intermediate Pressure Turbine dan Inlet Low Pressure Turbine*
9. *Ekstraksi A3*
10. *Ekstraksi A2*
11. *Ekstraksi A1*
12. *Outlet Low Pressure Turbine dan Inlet kondensor*
13. *Outlet kondensor dan Inlet Condensate Extraction Pump*
14. *Outlet Condensate Extraction Pump dan Inlet Gland Steam Condensate*
15. *Outlet Gland Steam Condensate dan Inlet Duplex Drain Cooler*

16. *Outlet Duplex Drain Cooler dan Inlet A1*
17. *Outlet A1 dan Inlet A2*
18. *Outlet A2 dan Inlet A3*
19. *Outlet A3 dan Inlet A4*
20. *Inlet A3 Drain Pump*
21. *Outlet A3 Drain Pump*
22. *Outlet A4*
23. *Inlet Feed Water Tank ,Inlet Feed Water Pump A dan Inlet Feed Water Pump B*
24. *Outlet Feed Water Pump A, Outlet Feed Water Pump B dan Inlet A6*
25. *Outlet A6 dan Inlet A7*
26. *Outlet A7 dan Inlet A8*
27. *Outlet A8 dan Inlet economizer*





Gambar 3.6 Langkah Analisis Kinerja PLTU Paiton Unit 5 pada Load 100%



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini saya melakukan penelitian dan pengumpulan data di PT. YTL (Jawa Power) PLTU Paiton pada Unit 5 saja. Berdasarkan data melalui hasil analisis yang telah dilakukan mengenai *heat rate*, efisiensi STU dan pengaruh-pengaruh penggunaan jumlah tingkat FWH, dapat digunakan untuk menjawab permasalahan-permasalahan pada bab sebelumnya serta menjadi gambaran untuk melakukan analisis *plant performance engineering*.

Data hasil penelitian yaitu berupa data-data perhitungan entalpi pada setiap titik yang berpengaruh pada analisis *heat rate* dan efisiensi. Data tersebut didapat dengan cara interpolasi terlebih dahulu pada tabel *properties* uap dari buku cengel. Kemudian data perhitungan *heat rate* dan efisiensi yang dihitung berdasarkan prinsip termodinamika. Pengambilan data dilakukan pada jam tertentu sesuai variabel terikat saya yaitu disaat *load* nya 100%. Kemudian data-data akan dikelompokkan berdasarkan variasi FWH A8 *in service* dan FWH A8 *bypass*.

4.1 Data dan Perhitungan

4.1.1 Feed Water Heater A8 In Service (8 Tingkat)

Data Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.6 merupakan data aktual data aktual saat FWH A8 *in service*, yang berasal dari *data record* yang disimpan pada DCS (*Distributed Control System*) di dalam CCR (*Central Control Room*). Di dalam sistem biasanya tidak hanya terdapat 1 *line* aliran fluida, tetapi ada juga yang memakai lebih dari 1 *line* aliran fluida sehingga harus dihitung terlebih dahulu nilai rata-rata nya. Untuk massa alir, contohnya massa alir *spray* nilainya harus dijumlahkan karena dalam aplikasinya menggunakan 2 *line*. Kemudian, massa alir *inlet economizer* adalah pengurangan dari massa alir *main steam* dengan massa alir SH *Spray*. Seluruh nilai *properties* diambil berdasarkan *load* aktual yang sama dan pada waktu yang sama.

Tabel 4.1

Data 1 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	186,9300	279,3199	567,0857
2	<i>Main steam</i>	168,9892	513,2999	569,0901
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,5321	312,3187	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,8411	512,9316	482,6720
5	<i>Reheater Spray</i>	200,2447	192,2100	4,6725
6	<i>Superheater Spray</i>	200,2447	192,2100	2,0044
7	<i>Flue gas</i>	-	401,9250	-

- Data 1 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 06.50, dengan *load* aktual = 640,9563 MW

Tabel 4.2

Data 2 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	186,8400	279,1199	564,2267
2	<i>Main steam</i>	169,1624	513,2999	566,1752
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	40,9697	312,9268	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,6904	518,8457	479,4044
5	<i>Reheater Spray</i>	200,3104	192,4500	4,0460
6	<i>Superheater Spray</i>	200,3104	192,4500	1,9485
7	<i>Flue gas</i>	-	404,1374	-

- Data 2 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 08.47 dengan *load* aktual = 640,9028 MW

Tabel 4.3

Data 3 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	186,7500	278,9199	562,1584
2	<i>Main steam</i>	169,2013	517,7999	564,3293
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	40,6879	316,6180	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,4287	527,833	475,1378
5	<i>Reheater Spray</i>	199,9852	191,8500	0,1540
6	<i>Superheater Spray</i>	199,9852	191,8500	2,1709
7	<i>Flue gas</i>	-	410,2375	-

- Data 3 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 17.50, dengan *load* aktual = 640,9563 MW

Tabel 4.4

Data 4 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% *Load*

No	Data	P (bar)	T (°C)	ṁ (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	185,3400	278,7999	556,8756
2	<i>Main steam</i>	167,9256	525,1200	560,3129
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	40,4033	319,6800	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,1306	531,7295	470,3828
5	<i>Reheater Spray</i>	198,1871	191,7000	0,1540
6	<i>Superheater Spray</i>	198,1871	191,7000	3,4373
7	<i>Flue gas</i>	-	402,8749	-

- Data 4 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 18.45, dengan *load* aktual = 640,8492 MW

Tabel 4.5

Data 5 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% *Load*

No	Data	P (bar)	T (°C)	ṁ (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	186,7800	278,6799	560,7356
2	<i>Main steam</i>	169,5311	524,7000	563,1097
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	40,6554	320,4727	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,1306	531,7295	470,3828
5	<i>Reheater Spray</i>	199,6378	191,4300	0,1435
6	<i>Superheater Spray</i>	199,6378	191,4300	2,3741
7	<i>Flue gas</i>	-	403,0624	-

- Data 5 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 18.22, dengan *load* aktual = 642,0804 MW

Tabel 4.6
Data 6 Feed Water Heater A8 In Service Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	ṁ (kg/s)
1	Inlet Economizer	186,9300	279,2000	560,7609
2	Main steam	169,5731	524,1000	563,1097
3	Cold Reheat Steam	40,5904	320,6354	-
4	Hot Reheat Steam	38,3329	532,6591	471,9850
5	Reheater Spray	199,7130	192,2100	0,1260
6	Superheater Spray	199,7130	192,2100	2,3488
7	Flue gas	-	403,5999	-

- Data 6 diambil pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 19.14, dengan *load* aktual = 641,5452 MW

4.1.1.1 Perhitungan Entalpi di Tiap Titik

Nilai entalpi di tiap titik didapatkan dengan cara melakukan interpolasi dari tabel *properties* (Cengel *et.al*, 2006).

Contoh Perhitungan

Menghitung entalpi *Main steam* pada data 1

P = 16,8989 MPa dan T = 513,2999 °C

- Interpolasi temperatur

Tekanan (MPa)	Entalpi (kJ/kg)	
	500(°C)	550(°C)
15	3310,8	3450,4
17,5	3276,7	3423,6

- Tekanan 15 MPa

$$h_{15MPa} = 3310,8 + \frac{(513,2999 - 500)}{(550 - 500)} \times (3450,4 - 3310,8)$$

$$h_{15MPa} = 3347,9333 \text{ kJ/kg}$$

- Tekanan 17,5 MPa

$$h_{17,5MPa} = 3276,7 + \frac{(513,2999 - 500)}{(550 - 500)} \times (3423,6 - 3276,7)$$

$$h_{17,5MPa} = 3315,7751 \text{ kJ/kg}$$

- Interpolasi Tekanan pada P = 16,8989 MPa

Tekanan (MPa)	Entalpi (kJ/kg)
15	3347,9333
17,5	3315,7751

$$h_2 = 3347,9333 + \frac{(16,8989 - 15)}{(17,5 - 15)} \times (3315,7751 - 3347,9333)$$

$$h_2 = 3323,5070 \text{ kJ/kg}$$

Berikut adalah seluruh data entalpi pada tiap titik untuk setiap data yang diambil :

Tabel 4.7

Data Entalpi Untuk Data 1 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1228,5633	\dot{m}_1	567,0857
2	<i>Main steam</i>	h_2	3323,5070	\dot{m}_2	569,0901
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	2990,7392	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3476,8708	\dot{m}_4	482,672
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	826,2985	\dot{m}_5	4,6725
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	826,2985	\dot{m}_6	2,0044

Tabel 4.8

Data Entalpi Untuk Data 2 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1227,2348	\dot{m}_1	564,2267
2	<i>Main steam</i>	h_2	3323,2842	\dot{m}_2	566,1752
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	2992,6150	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3490,5468	\dot{m}_4	479,4044
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	827,3488	\dot{m}_5	4,0460
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	827,3488	\dot{m}_6	1,9485

Tabel 4.9

Data Entalpi Untuk Data 3 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1226,2629	\dot{m}_1	562,1584
2	<i>Main steam</i>	h_2	3336,3027	\dot{m}_2	564,3293
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3003,2914	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3511,3522	\dot{m}_4	475,1378
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	824,7149	\dot{m}_5	2,1709
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	824,7149	\dot{m}_6	0,1540

Tabel 4.10

Data Entalpi Untuk Data 4 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1225,7307	\dot{m}_1	556,8756
2	<i>Main steam</i>	h_2	3359,1142	\dot{m}_2	560,3129
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3012,2670	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3520,5583	\dot{m}_4	470,3828
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	823,9725	\dot{m}_5	3,4373
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	823,9725	\dot{m}_6	0,1540

Tabel 4.11

Data Entalpi Untuk Data 5 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1225,0914	\dot{m}_1	560,7356
2	<i>Main steam</i>	h_2	3355,9393	\dot{m}_2	563,1097
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3013,5962	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3526,7971	\dot{m}_4	471,8272
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	822,8656	\dot{m}_5	2,3741
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	822,8656	\dot{m}_6	0,1435

Tabel 4.12

Data Entalpi Untuk Data 6 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1227,6219	\dot{m}_1	560,7609
2	<i>Main steam</i>	h_2	3354,1443	\dot{m}_2	563,1097
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3014,2237	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3522,4719	\dot{m}_4	471,9850
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	826,2721	\dot{m}_5	2,3488
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	826,2721	\dot{m}_6	0,1260

4.1.1.2 Perhitungan *Heat Rate*

Contoh Perhitungan

- Menghitung input kalor pada data 1

$$Q_{in\ 1} = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1) + \dot{m}_5 \cdot (h_2 - h_5)$$

$$Q_{in\ 1} = 567,0857 \cdot (3323,507 - 1228,5633) + 2,0044 \cdot (3323,507 - 826,2985)$$

$$Q_{in\ 1} = 1.193.018,014\ kJ/s$$

$$Q_{in\ 2} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_6) \cdot (h_4 - h_3) + \dot{m}_6(h_4 - h_6)$$

$$Q_{in\ 2} = (482,672 - 4,6725) \cdot (3476,8708 - 2990,7392) + 4,6725 \cdot (3476,8708 - 826,2985)$$

$$Q_{in\ 2} = 244.755,464\ kJ/s$$

$$Q_{in\ total} = Q_{in\ 1} + Q_{in\ 2}$$

$$Q_{in\ total} = 1.193.018,014 + 244.755,464$$

$$Q_{in\ total} = 1.437.773,478\ kJ/s$$

- *Heat rate*

$$HR = \frac{3600s \times 1.437.773,478\ kJ/s}{640956,3\ kWh}$$

$$HR = 8075,409\ kJ/kWh$$

4.1.1.3 Perhitungan Efisiensi *Thermal*

$$\eta_{th} = \frac{1}{3600 \cdot HR}$$

$$\eta_{th} = \frac{1}{3600 \times 8075,409\ kJ/kWh}$$

$$\eta_{th} = 0,44579$$

$$\eta_{th} = 44,579\ \%$$

Berikut data hasil perhitungan *performance* Unit 5 saat *FWH* A8 *in service* pada kondisi 100% *load* :

Tabel 4.13

Hasil Perhitungan *Performance* Unit 5 saat *FWH* A8 *In service*

Data	<i>Actual Load</i> (MW)	<i>Heat rate</i> (kJ/kWh)	Efisiensi (%)	Temperatur <i>Main steam</i> (°C)	Temperatur <i>Flue gas</i> (°C)
1	640,9563	8075,41	44,58	513,29	401,925
2	640,9028	8060,40	44,66	513,29	404,137
3	640,9563	8050,64	44,72	517,79	410,237
4	640,8492	8067,76	44,62	525,12	402,874
5	642,0804	8092,33	44,49	524,70	403,062
6	641,5452	8072,46	44,60	524,10	403,599
Com.	640,000	7856,00	45,82	538,00	-

4.1.2 Feed Water Heater A8 Bypass (7 Tingkat)

Data Tabel 4.14 sampai dengan Tabel 4.19 merupakan data aktual saat FWH A8 *bypass*, yang berasal dari *data record* yang disimpan pada DCS (*Distributed Control System*) di dalam CCR (*Central Control Room*). Di dalam sistem biasanya tidak hanya terdapat 1 *line* aliran fluida, tetapi ada juga yang memakai lebih dari 1 *line* aliran fluida sehingga harus dihitung terlebih dahulu nilai rata-rata nya. Untuk massa alir, contohnya massa alir *spray* nilainya harus dijumlahkan karena dalam aplikasinya menggunakan 2 *line*. Kemudian, massa alir *inlet economizer* adalah pengurangan dari massa alir *main steam* dengan massa alir SH *Spray*. Seluruh nilai *properties* diambil berdasarkan *load* aktual yang sama dan pada waktu yang sama.

Tabel 4.14

Data 1 Feed Water Heater A8 Bypass Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	ṁ (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	183,9000	254,0000	536,5633
2	<i>Main steam</i>	167,6996	529,3799	540,4490
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,1893	331,1288	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,9354	532,2233	477,1068
5	<i>Reheater Spray</i>	195,4544	193,7400	2,2260
6	<i>Superheater Spray</i>	195,4544	193,7400	3,8857
7	<i>Flue gas</i>	-	394,2124	-

- Data 1 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 08.55, dengan *load* aktual = 640,9028 MW

Tabel 4.15

Data 2 Feed Water Heater A8 Bypass Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	ṁ (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	183,6000	253,8800	538,3445
2	<i>Main steam</i>	167,3511	528,2999	542,8278
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,2001	329,0363	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,9494	526,771	480,484
5	<i>Reheater Spray</i>	194,9322	193,5000	4,0460
6	<i>Superheater Spray</i>	194,9322	193,5000	4,4833
7	<i>Flue gas</i>	-	400,0499	-

- Data 2 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 10.05 dengan *load* aktual = 640,2604 MW

Tabel 4.16

Data 3 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	182,1000	254,2400	528,2637
2	<i>Main steam</i>	166,7009	533,9399	537,0020
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,1378	332,8499	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,8501	538,035	473,9899
5	<i>Reheater Spray</i>	193,5449	193,2300	4,0285
6	<i>Superheater Spray</i>	193,5449	193,2300	8,7383
7	<i>Flue gas</i>	-	392,2499	-

- Data 3 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 13.15, dengan *load* aktual = 640,4210 MW

Tabel 4.17

Data 4 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	182,0700	254,1600	526,7588
2	<i>Main steam</i>	166,1843	533,9399	537,0020
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,0836	333,7617	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,7594	536,5437	474,1628
5	<i>Reheater Spray</i>	192,5279	193,1100	3,6645
6	<i>Superheater Spray</i>	192,5279	193,1100	10,2432
7	<i>Flue gas</i>	-	397,1499	-

- Data 4 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 15.26, dengan *load* aktual = 640,8492 MW

Tabel 4.18

Data 5 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	181,9200	253,8400	538,0342
2	<i>Main steam</i>	166,5775	543,7683	543,7683
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,2760	329,4058	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	39,0084	531,961	480,3177
5	<i>Reheater Spray</i>	193,8428	192,7200	0,2590
6	<i>Superheater Spray</i>	193,8428	192,7200	5,7341
7	<i>Flue gas</i>	-	390,7124	-

- Data 5 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 18.27, dengan *load* aktual = 641,2775 MW

Tabel 4.19

Data 6 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% *Load*

No	Data	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	184,0200	252,2400	539,9382
2	<i>Main steam</i>	168,3946	530,1000	548,4243
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	41,5307	331,9908	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	38,3329	532,6591	471,9850
5	<i>Reheater Spray</i>	193,8428	192,7200	0,2590
6	<i>Superheater Spray</i>	193,8428	192,7200	8,4861
7	<i>Flue gas</i>	-	392,4124	-

- Data 6 diambil pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 19.45, dengan *load* aktual = 642,5622 MW

4.1.2.1 Perhitungan Entalpi di Tiap Titik

Contoh Perhitungan

Menghitung entalpi *Cold Reheat Steam* pada data 1

P = 4,1189 MPa dan T = 331,1288 °C

- Interpolasi temperatur

Tekanan (MPa)	Entalpi (kJ/kg)	
	300(°C)	350(°C)
4	2961,7	3093,3
4,5	2944,2	3081,5

- Tekanan 4 MPa

$$h_{4MPa} = 2961,7 + \frac{(331,1288 - 300)}{(350 - 300)} \times (3093,3 - 2961,7)$$

$$h_{4MPa} = 3043,6310 \text{ kJ/kg}$$

- Tekanan 4,5 MPa

$$h_{4,5MPa} = 2944,2 + \frac{(331,1288 - 300)}{(350 - 300)} \times (3081,5 - 2944,2)$$

$$h_{4,5MPa} = 3029,6797 \text{ kJ/kg}$$

- Interpolasi Tekanan pada P = 4,1189 MPa

Tekanan (MPa)	Entalpi (kJ/kg)
4	3043,6310
4,5	3029,6797

$$h_3 = 3043,6310 + \frac{(4,1189 - 4)}{(4,5 - 4)} \times (3029,6797 - 3043,6310)$$

$$h_3 = 3040,3125 \text{ kJ/kg}$$

Berikut adalah seluruh data entalpi pada tiap titik untuk setiap data yang diambil :

Tabel 4.20

Data Entalpi Untuk Data 1 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1105,8327	\dot{m}_1	536,5633
2	<i>Main steam</i>	h_2	3371,7233	\dot{m}_2	540,4490
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3040,3125	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3520,8561	\dot{m}_4	477,1068
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	832,7421	\dot{m}_5	3,8857
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	832,7421	\dot{m}_6	2,2260

Tabel 4.21

Data Entalpi Untuk Data 2 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1105,2662	\dot{m}_1	538,3445
2	<i>Main steam</i>	h_2	3369,0141	\dot{m}_2	542,8278
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3034,7177	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3508,3808	\dot{m}_4	480,484
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	831,6695	\dot{m}_5	4,4833
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	831,6695	\dot{m}_6	2,7055

Tabel 4.22

Data Entalpi Untuk Data 3 *Feed Water Heater A8 Bypass* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1106,9484	\dot{m}_1	528,2637
2	<i>Main steam</i>	h_2	3386,0904	\dot{m}_2	537,0020
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3045,0308	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3534,2242	\dot{m}_4	473,9899
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	830,4240	\dot{m}_5	8,7383
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	830,4240	\dot{m}_6	4,0285

Tabel 4.23

Data Entalpi Untuk Data 4 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1106,5668	\dot{m}_1	526,7588
2	<i>Main steam</i>	h_2	3386,6927	\dot{m}_2	537,0020
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3047,6023	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3530,9087	\dot{m}_4	474,1628
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	829,8510	\dot{m}_5	10,2432
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	829,8510	\dot{m}_6	3,6645

Tabel 4.24

Data Entalpi Untuk Data 5 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1105,0717	\dot{m}_1	538,0342
2	<i>Main steam</i>	h_2	3363,8752	\dot{m}_2	543,7683
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3035,4856	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3520,1812	\dot{m}_4	480,3177
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	828,2122	\dot{m}_5	5,7341
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	828,2122	\dot{m}_6	0,2590

Tabel 4.25

Data Entalpi Untuk Data 6 *Feed Water Heater A8 In Service* Pada Kondisi 100% Load

No	Data	h (kJ/kg)	(kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	(kg/s)
1	<i>Inlet Economizer</i>	h_1	1106,9629	\dot{m}_1	539,9382
2	<i>Main steam</i>	h_2	3372,9824	\dot{m}_2	548,4243
3	<i>Cold Reheat Steam</i>	h_3	3041,6587	\dot{m}_3	-
4	<i>Hot Reheat Steam</i>	h_4	3512,9399	\dot{m}_4	483,3922
5	<i>Reheater Spray</i>	h_5	828,2122	\dot{m}_5	8,4861
6	<i>Superheater Spray</i>	h_6	828,2122	\dot{m}_6	0,2590

4.1.2.2 Perhitungan *Heat rate*

Contoh Perhitungan

- Menghitung input kalor pada data 1

$$Q_{in 1} = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1) + \dot{m}_5 \cdot (h_2 - h_5)$$

$$Q_{in 1} = 536,5633 \cdot (3371,7233 - 1105,8327) + 3,8857 \cdot (3371,7233 - 832,7421)$$

$$Q_{in\ 1} = 1.225.659,442\ kJ/s$$

$$Q_{in\ 2} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_6) \cdot (h_4 - h_3) + \dot{m}_6(h_4 - h_6)$$

$$Q_{in\ 2} = (477,1068 - 2,2260) \cdot (3520,8561 - 3040,3125) + 2,2260 \cdot (3520,8561 - 832,7421)$$

$$Q_{in\ 2} = 234.184,671\ kJ/s$$

$$Q_{in\ total} = Q_{in\ 1} + Q_{in\ 2}$$

$$Q_{in\ total} = 1.225.659,442 + 234.184,671$$

$$Q_{in\ total} = 1.459.844,113\ kJ/s$$

- Heat rate

$$HR = \frac{3600s \times 1.459.844,113\ kJ/s}{640902,8\ kWh}$$

$$HR = 8200,056\ kJ/kWh$$

4.1.2.3 Perhitungan Efisiensi Thermal

$$\eta_{th} = \frac{1}{3600 \cdot HR}$$

$$\eta_{th} = \frac{1}{3600 \times 8200,056\ kJ/kWh}$$

$$\eta_{th} = 0,43902$$

$$\eta_{th} = 43,902\ \%$$

Berikut data hasil perhitungan *performance* Unit 5 saat *FWH A8 bypass* pada kondisi 100% load :

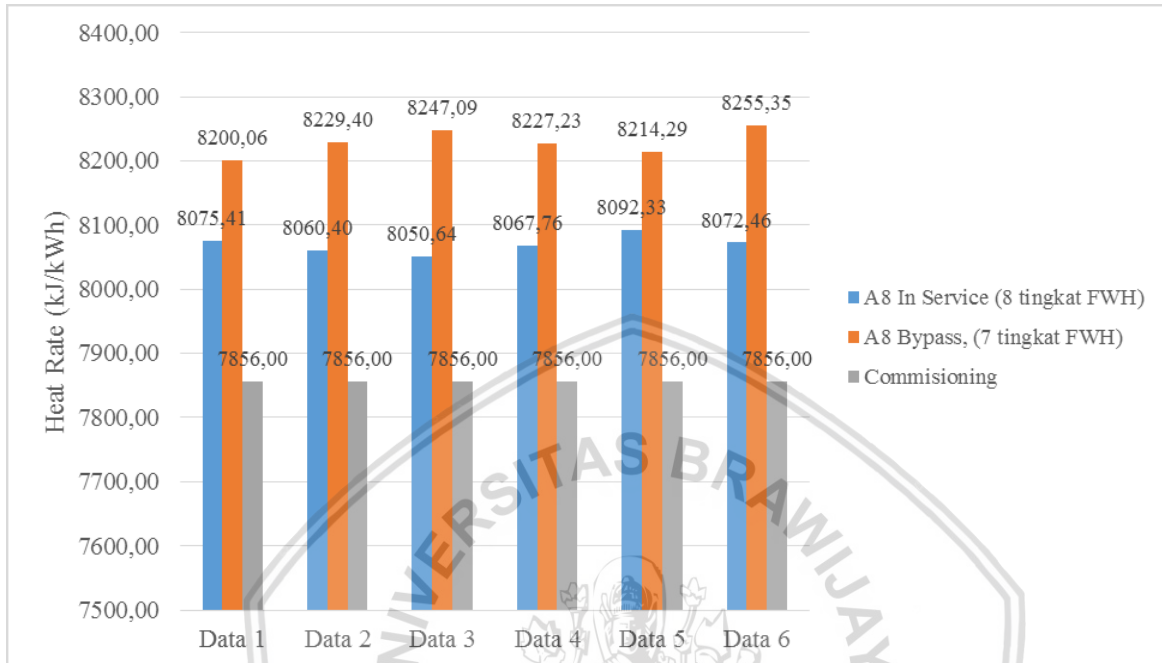
Tabel 4.26

Hasil Perhitungan *Performance* Unit 5 saat *FWH A8 bypass*

Data	<i>Actual Load</i> (MW)	<i>Heat rate</i> (kJ/kWh)	Efisiensi (%)	Temperatur <i>Main steam</i> (°C)	Temperatur <i>Flue gas</i> (°C)
1	640,9028	8200,06	43,90	529,38	394,212
2	640,2604	8229,40	43,75	528,29	400,049
3	640,4210	8247,09	43,65	533,94	392,249
4	640,8490	8227,23	43,76	533,94	397,149
5	641,2775	8214,29	43,83	526,94	390,712
6	642,5622	8255,35	43,61	530,20	392,412
Com.	640,000	7856,00	45,82	538,00	-

4.2 Grafik dan Pembahasan

4.2.1 Perbandingan Jumlah Tingkat *Feed Water Heater* Terhadap *Heat Rate* Sistem Tenaga Uap Pada 100% *Load*



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap *Heat Rate* Sistem Tenaga Uap Pada 100% *Load*

Gambar 4.1 menunjukkan grafik tentang hubungan jumlah tingkat FWH terhadap nilai *heat rate* pada PLTU Paiton Unit 5 saat *load* 100%. *Heat rate* adalah nilai kalor atau panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh listrik (kJ/kWh). Grafik batang berwarna biru menunjukkan data-data saat FWH A8 di gunakan atau *in service*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 8 tingkat. Grafik batang berwarna merah menunjukkan data-data saat FWH A8 tidak digunakan atau di *bypass*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 7 tingkat. Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak mampu menghasilkan *heat rate* PLTU yang lebih rendah untuk seluruh data yang diambil. Pada grafik dapat dilihat *heat rate* PLTU tertinggi adalah saat FWH A8 *bypass* pada data ke 6, data ini diambil saat *load* aktual sebesar 642,562 MW pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 19.45 WIB. Sedangkan *heat rate* PLTU terendah adalah saat FWH A8 *in service* pada data ke 3, data ini diambil saat *load* aktual sebesar 640,9563 MW pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 17.50 WIB. Pada grafik dapat dilihat bahwa kecenderungan dari nilai *heat rate* yang didapatkan cenderung konstan. Fluktuasi nilai yang terjadi karena data yang diambil hanya berdasarkan waktu, sehingga nilai *heat rate* sistem tidak dapat

menunjukkan nilai yang sama. Namun, kecenderungan yang terjadi tetaplah konstan karena *load* yang diambil dijaga konstan.

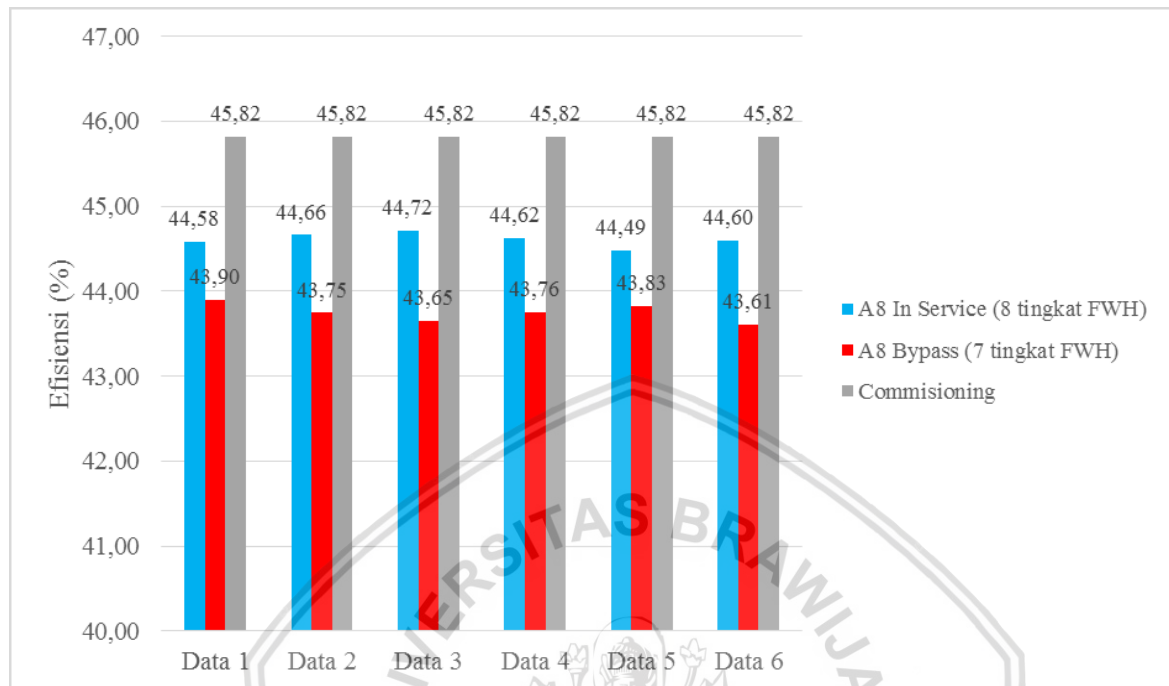
Penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat menurunkan nilai *heat rate* yang dibutuhkan. Dikarenakan temperatur *feed water* yang memasuki *economizer* lebih tinggi dari pada saat jumlah tingkat FWH lebih sedikit, dengan besar tekanan kerja yang hampir sama. Hal ini dapat dibuktikan pada data FWH A8 *in service* ke 1, temperatur *feed water* memasuki *economizer* adalah 279,32 C. Sedangkan pada data FWH A8 *bypass* ke 1 temperatur *feed water* memasuki *economizer* adalah 254,00 C. Pada saat temperatur *feed water* lebih tinggi, fase *feed water* akan cenderung mendekati garis jenuhnya. Hal ini akan menyebabkan besar kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan *feed water* dan merubah fase *feed water* menjadi *superheated steam* menjadi lebih rendah sehingga *heat rate* yang dibutuhkan juga akan lebih rendah. Apabila *heat rate* yang dibutuhkan lebih rendah, *firing* yang dibutuhkan pada *boiler* juga akan rendah sehingga jumlah bahan bakar yang digunakan akan lebih hemat pada *load* yang sama.

Apabila dibandingkan dengan data *commissioning*, data *commissioning* adalah data yang diambil saat pembangkit pertama kali atau awal beroperasi. Pada saat awal beroperasi *heat rate* PLTU Paiton Unit 5 sebesar 7856 kJ/kWh. Jika mengabaikan nilai kalori bahan bakar (GCV batu bara) atau dengan kata lain dianggap sama, *heat rate* pada waktu itu sangat rendah dikarenakan kondisi *boiler* masih sangat optimal. Optimal yang dimaksud adalah *boiler* mampu meningkatkan temperatur dari 278 C sampai dengan 538 C, hal ini dapat dilihat pada data *commissioning*. Selain itu, apabila panas yang dihasilkan mampu diserap semaksimal mungkin oleh *feed water*. Pengaruh penggunaan jumlah tingkat FWH dalam hal ini yaitu, saat menggunakan FWH dengan 8 tingkat lebih mendekati nilai *heat rate existing* dengan *heat rate* saat *commissioning*.

4.2.2 Perbandingan Jumlah Tingkat Feed Water Heater Terhadap Efisiensi Thermal Sistem Tenaga Uap pada 100% Load.

Gambar 4.2 menunjukkan grafik tentang hubungan jumlah tingkat FWH terhadap nilai efisiensi pada PLTU Paiton Unit 5 saat *load* 100%. Efisiensi adalah nilai perbandingan antara kerja bersih yang dihasilkan dengan kalor yang ditambahkan pada siklus atau instalasi-daya (%). Grafik batang berwarna biru menunjukkan data-data saat FWH A8 digunakan atau *in service*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 8 tingkat. Grafik batang berwarna merah menunjukkan data-data saat FWH A8 tidak digunakan atau di *bypass*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 7 tingkat. Pada Gambar 4.2

dapat dilihat bahwa penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak mampu menghasilkan efisiensi PLTU yang lebih tinggi untuk seluruh data yang diambil.



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap Efisiensi Thermal Sistem Tenaga Uap Pada 100% Load.

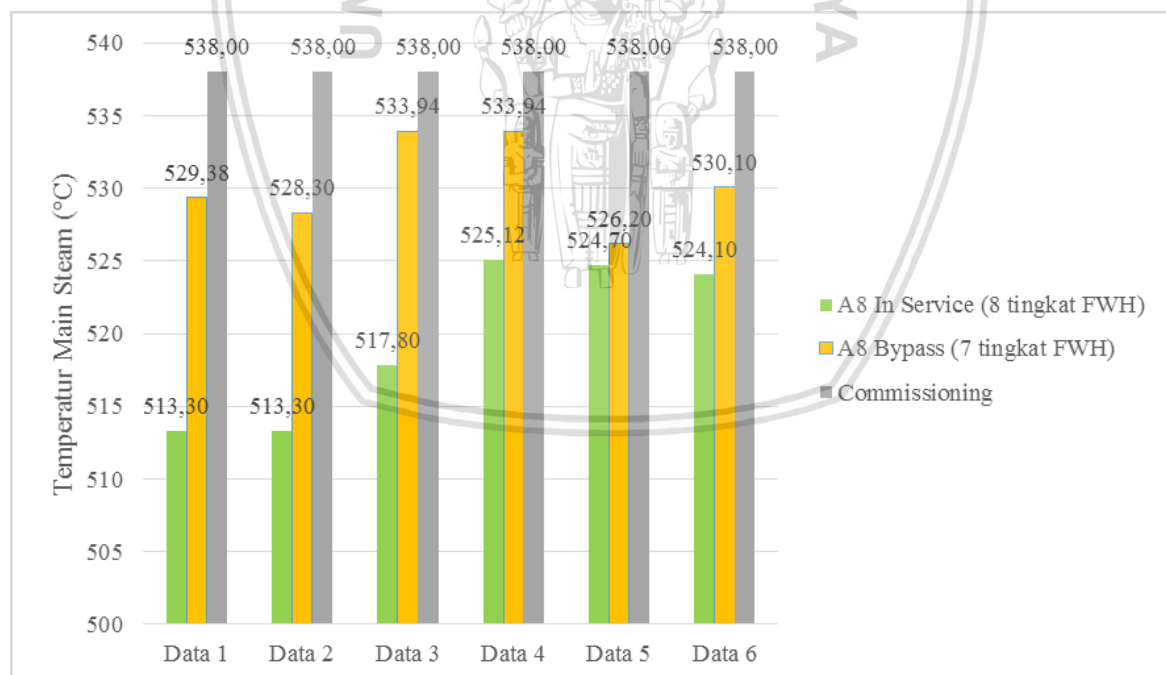
Pada grafik dapat dilihat efisiensi PLTU tertinggi adalah saat FWH A8 *in service* pada data ke 3, data ini diambil saat *load* aktual sebesar 640,9563 MW pada tanggal 19 Januari 2018 pukul 17.50 WIB. Sedangkan efisiensi PLTU terendah adalah saat FWH A8 *bypass* pada data ke 6, data ini diambil saat *load* aktual sebesar 642,562 MW pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 19.45 WIB. Pada grafik dapat dilihat bahwa kecenderungan dari nilai efisiensi yang didapatkan cenderung konstan. Fluktuasi nilai yang terjadi karena data yang diambil hanya berdasarkan waktu, sehingga nilai efisiensi sistem tidak dapat menunjukkan nilai yang sama. Namun, kecenderungan yang terjadi tetap lah konstan karena *load* yang diambil dijaga konstan.

Penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai efisiensi yang dihasilkan. Karena penggunaan FWH 8 tingkat akan menyebabkan *overall temperature difference* akan menjadi lebih rendah. Hal ini dikarenakan temperatur *feed water* memasuki *economizer* yang lebih tinggi dapat tercapai tanpa menghasilkan irreversibilitas yang tinggi. Kemudian, saat FWH A8 di *bypass* beda temperatur fluida pemanas dengan fluida kerja terlalu tinggi (*pinch point* terlalu tinggi), hal ini akan

menyebabkan irreversibilitas yang tinggi sehingga akan menyebabkan nilai efisiensi sistem menjadi rendah.

Apabila dibandingkan dengan data *commissioning*, data *commissioning* adalah data yang diambil saat pembangkit pertama kali atau awal beroperasi. Pada saat awal beroperasi efisiensi PLTU Paiton Unit 5 sebesar 45,86 %. Jika ditinjau pada kondisi awal beroperasi kebutuhan panas yang dibutuhkan jauh lebih rendah dari kondisi sekarang. Sehingga untuk nilai efisiensi sistem yang dihitung berdasarkan *heat rate* nya, nilainya akan semakin rendah, karena untuk menghasilkan *output* daya yang sama dibutuhkan panas yang lebih tinggi. Maka dari itulah nilai efisiensi termal saat *commissioning* jauh lebih tinggi. Pengaruh penggunaan jumlah tingkat FWH dalam hal ini yaitu, saat menggunakan FWH dengan 8 tingkat akan lebih mendekati nilai efisiensi termal *existing* dengan efisiensi termal saat *commissioning*.

4.2.3 Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap Temperatur *Main steam* yang Dihasilkan Pada 100% Load



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap Temperatur *Main steam* yang Dihasilkan Pada 100% Load

Gambar 4.3 menunjukkan grafik tentang hubungan jumlah tingkat FWH terhadap temperatur *main steam* yang dihasilkan pada 100% load. *Main steam* adalah uap dalam fase sudah *superheated* atau dalam hal ini uap yang keluar dari *superheater* dan siap untuk

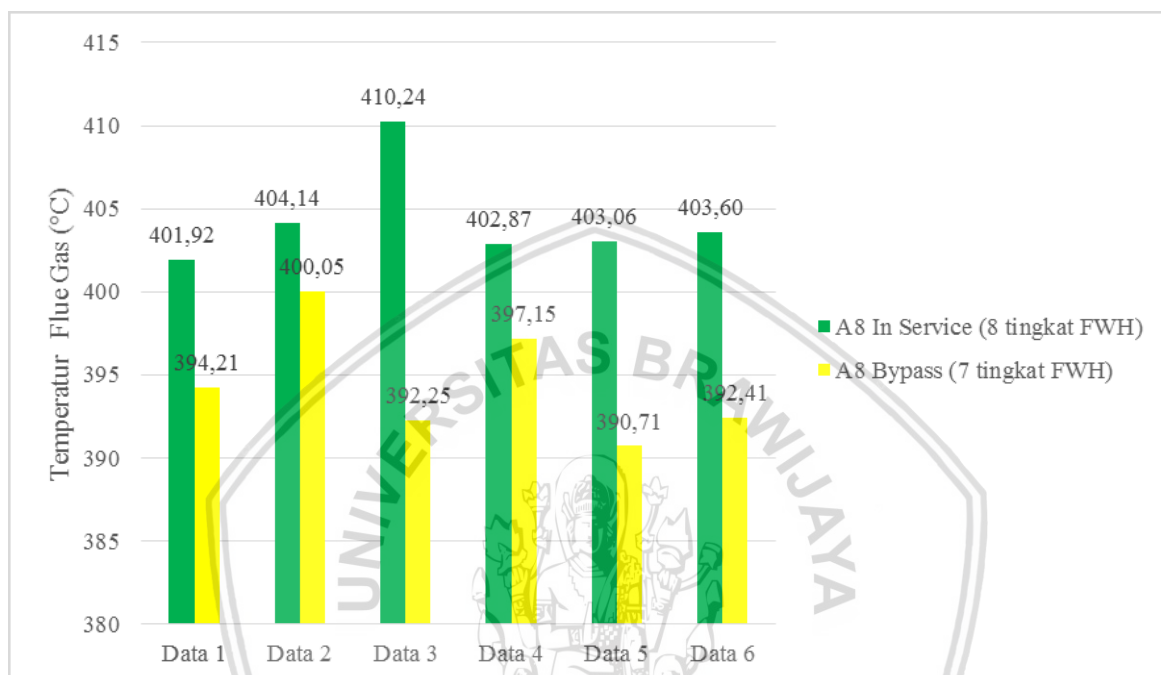
diekspansikan pertama kali di HP Turbin. Grafik batang berwarna hijau menunjukkan data-data saat FWH A8 di gunakan atau *in service*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 8 tingkat. Grafik batang berwarna kuning menunjukkan data-data saat FWH A8 tidak digunakan atau di *bypass*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 7 tingkat. Pada grafik dapat dilihat nilai temperatur MS terjadi fluktuasi yang signifikan. Hal ini terjadi karena setiap data yang diambil penyerapan panas yang terjadi dalam *boiler* tidak dapat dikondisikan sama. Kemudian, temperatur *feed water* yang memasuki *boiler* juga cenderung berubah-ubah.

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa saat menggunakan 8 tingkat FWH temperatur *main steam* lebih rendah untuk seluruh data yang diambil. Sedangkan saat menggunakan 7 tingkat FWH justru temperatur *main steam* lebih tinggi untuk seluruh data yang diambil. Hal ini dikarenakan *heat rate* saat FWH A8 di *bypass* lebih tinggi, sehingga *boiler* memiliki panas yang lebih tinggi. *Heat rate* tinggi ini dibutuhkan untuk menjaga kondisi temperatur *main steam* dapat tercapai, sehingga harus di berikan input tambahan. Karena pada saat memasuki *economizer* temperatur *feed water* lebih rendah. Ini lah kerugian yang diakibatkan oleh penggunaan FWH yang hanya 7 tingkat. Tetapi hal ini juga akan menguntungkan, karena temperatur *main steam* akan mempengaruhi tingkat kekeringan uap. Semakin tinggi temperatur maka uap yang dihasilkan akan semakin kering. Hal ini tidak berdampak pada HP dan IP Turbin, namun akan sangat berdampak pada LP Turbin. Karena pada saat diekspansikan di dalam rangkaian turbin, temperatur uap akan turun drastis sehingga apabila temperatur *main steam* yang dihasilkan rendah maka temperatur uap yang masuk kedalam LP Turbin ditakutkan terlalu rendah. Hal ini akan menyebabkan terjadi nya lubang lubang pengikisan pada bilah bilah LP Turbin. Jadi jumlah penggunaan *feed water heater* berpengaruh terhadap temperatur *main steam* yang dihasilkan dan hal ini akan berpengaruh pada kualitas uap yang akan berdampak pada komponen STU, khususnya LP Turbin.

Apabila dibandingkan dengan data *commissioning*, data *commissioning* adalah data yang diambil saat pembangkit pertama kali atau awal beroperasi. Pada saat awal beroperasi temperatur *main steam* yang dihasilkan 538°C. Pada saat *commissioning* FWH yang digunakan adalah 8 tingkat. Jika dibandingkan, temperatur *main steam* pada saat *commissioning* lebih tinggi dari pada seluruh data yang diambil pada kondisi *existing*, dan hal itu terjadi hanya dengan kebutuhan *heat rate* yang jauh lebih kecil. Sedangkan pada kondisi sekarang, dengan *heat rate* yang besar sistem tidak mampu untuk mencapai temperatur *main steam* seperti saat *commissioning*. Hal ini dikarenakan penyerapan panas

pada *boiler* sudah tidak optimal lagi sehingga walaupun *boiler* sudah menghasilkan panas yang tinggi temperatur *main steam* tidak dapat tercapai.

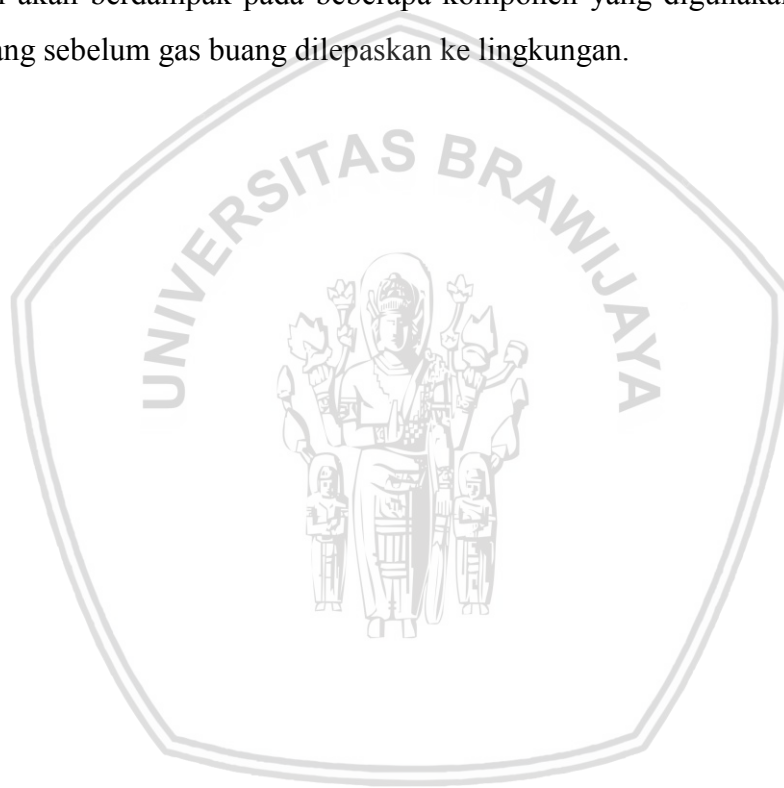
4.2.4 Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap Temperatur *Flue Gas* Keluar *Boiler* Pada 100% Load



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Perbandingan Jumlah Penggunaan *Feed Water Heater* Terhadap Temperatur *Flue Gas* Keluar *Boiler* Pada 100% Load

Pada Gambar 4.4 menunjukkan grafik tentang hubungan jumlah tingkat FWH terhadap temperatur *flue gas* keluar *boiler* pada 100% load. *Flue gas* adalah gas hasil pembakaran yang keluar dari *boiler*, biasanya saat keluar dari *boiler* temperatur *flue gas* masih tinggi. Pada hal ini panas dari *flue gas* akan dimanfaatkan untuk memanaskan *primary air* dan *secondary air*, lalu juga digunakan untuk memaskan gas yang keluar dari FGD yang kemudian dilepas ke lingkungan melalui *stack* (cerobong). Grafik batang berwarna hijau menunjukkan data-data saat FWH A8 di gunakan atau *in service*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 8 tingkat. Grafik batang berwarna kuning menunjukkan data-data saat FWH A8 tidak digunakan atau di *bypass*, pada data ini jumlah FWH yang digunakan adalah 7 tingkat. Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa saat menggunakan 8 tingkat FWH mampu menghasilkan temperatur *flue gas* yang lebih tinggi untuk seluruh data yang diambil. Sedangkan saat menggunakan 7 tingkat FWH justru menghasilkan temperatur *flue gas* yang lebih rendah untuk seluruh data yang diambil. Hal ini dikarenakan saat *feed water*

memasuki *economizer* temperaturnya lebih rendah sehingga saat *flue gas* juga melewati *economizer* terjadi penyerapan panas dari *flue gas* yang cukup besar sehingga *flue gas* mengalami penurunan temperatur lebih banyak. Hal ini lebih menguntungkan, karena apabila ditinjau dari sisi *boiler*, seluruh panas yang dihasilkan *boiler* akan lebih banyak yang terserap oleh *feed water* sehingga mampu meningkatkan nilai efisiensi *boiler*. Yang kedua, apabila temperatur *flue gas* yang keluar dari *boiler* masih terlalu tinggi beberapa komponen seperti *Gas-Gas Heater*, *Gas-Air Heater* dan FGD menjadi rawan terjadi kerusakan. Karena komponen tersebut memiliki limit temperatur kerja. Jadi jumlah penggunaan *feed water heater* berpengaruh terhadap temperatur *flue gas* yang keluar dari *boiler* dan hal ini akan berdampak pada beberapa komponen yang digunakan untuk men *treatment* gas buang sebelum gas buang dilepaskan ke lingkungan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat menurunkan nilai *heat rate* yang dibutuhkan. Dikarenakan temperatur *feed water* yang memasuki *economizer* lebih tinggi dari pada saat jumlah tingkat FWH lebih sedikit, sehingga *heat rate* yang dibutuhkan juga akan lebih rendah.
2. Penggunaan jumlah tingkat FWH yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai efisiensi yang dihasilkan. Dikarenakan temperature *feed water* memasuki *economizer* yang lebih tinggi dapat tercapai tanpa menghasilkan irreversibilitas yang tinggi. Selain itu, beda temperatur fluida pemanas dengan fluida kerja juga tidak terlalu tinggi (*pinch point* tidak terlalu tinggi).
3. Saat menggunakan 7 tingkat FWH justru temperatur *main steam* lebih tinggi untuk seluruh data yang diambil. Hal ini dikarenakan *heat rate* saat FWH A8 di *bypass* lebih tinggi, karena saat memasuki *economizer* temperatur *feed water* lebih rendah. Ini lah kerugian yang diakibatkan oleh penggunaan FWH yang hanya 7 tingkat.
4. Menggunakan 7 tingkat FWH menguntungkan untuk beberapa komponen, karena semakin tinggi temperatur maka uap yang dihasilkan akan semakin kering. Karena apabila temperatur *main steam* yang dihasilkan rendah maka temperatur uap yang masuk kedalam LP Turbin ditakutkan akan terlalu rendah. Hal ini akan menyebabkan terjadi nya lubang lubang pengikisan pada bilah bilah LP Turbin.
5. Saat menggunakan 7 tingkat FWH justru menghasilkan temperatur *flue gas* yang lebih rendah untuk seluruh data yang diambil. Hal ini dikarenakan saat *feed water* memasuki *economizer* temperaturnya lebih rendah sehingga saat *flue gas* juga melewati *economizer* terjadi penyerapan panas dari *flue gas* yang cukup besar sehingga *flue gas* mengalami penurunan temperatur lebih banyak.
6. Menggunakan 7 tingkat FWH lebih menguntungkan untuk beberapa komponen, karena apabila ditinjau dari sisi *boiler*, seluruh panas yang dihasilkan *boiler* akan lebih banyak yang terserap oleh *feed water* sehingga mampu meningkatkan nilai efisiensi *boiler*. Yang kedua, apabila temperatur *flue gas* yang keluar dari *boiler* masih terlalu tinggi

beberapa komponen seperti *Gas-Gas Heater*, *Gas-Air Heater* dan FGD menjadi rawan terjadi kerusakan. Karena komponen tersebut memiliki limit temperatur kerja.

5.2 Saran

1. Sebaiknya penelitian-penelitian dalam bidang proses pada industri lebih ditingkatkan karena hal ini sangat dibutuhkan oleh perusahaan dalam melakukan *improvement*. Selain itu, akan lebih memudahkan mahasiswa dalam menghadapi persaingan saat memasuki dunia kerja.
2. *Performance* terbaik adalah saat menggunakan 8 tingkat FWH, namun untuk penggunaan dalam waktu yang lama akan menyebabkan kerusakan pada beberapa komponen. Jadi juga diperlukan proteksi pada hal tersebut dengan cara mem *bypass* FWH ke 8.
3. Sebaiknya perusahaan melakukan *improvement* pada *boiler*. Karena seluruh perhitungan *performance* menunjukkan bahwa kondisi *existing* sudah terpaut jauh dengan kondisi saat *commissioning*.
4. Untuk meningkatkan penyerapan panas, perusahaan sebaiknya melakukan *maintenance* pada pipa-pipa *evaporator*, *superheater* dan *reheater*. Selain itu, juga perlu dilakukan penelitian mengenai perpindahan panas pada tiap komponen tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2012. Perencanaan Efisiensi dan Elastisitas Energi. Jakarta: BPPT.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2016. *Outlook Energy Indonesia*. Jakarta: BPPT.
- Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. 2006. *Thermodynamics: An Engineering Approach. 5th edition*. New York: Mc Graw-Hill.
- El-Wakil, M. M. 1984. *Powerplant Technology*. Singapore: Mc Graw-Hill Company.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 1*.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 2*.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 3*.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 4*.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 5*.
- Group, Power Generation. 1998. *Siemens Plant Course*. SIEMENS AG. Jerman. *Volume 6*.
- Inc, ABB-CE Service, 1998, *Boiler Operations Training Module for Paiton Private Power Project Unit 5 & 6, Volume 1*, Operation and Maintenance Training Department, USA
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2017. *Handbook of Energy & Economy Statistic of Indonesia*. Jakarta: Kemen ESDM.
- Nurmalita. 2012. Analisis Efisiensi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Energi Alam Raya Semesta di Kabupaten Nagan Raya, Nangroe Aceh Darussalam. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Pudjanarsa, Astu dan Nursuhud, Djati. 2013. *Mesin Konversi Energi*. Edisi 3. Yogyakarta: CV. ANDI OFFSET.
- Rizky Yusuf. 2015. Analisis Termodinamika Pengaruh Aliran Massa Ekstraksi Turbin Uap Bagian *High Pressure* Untuk *Feedwater Heater* Terhadap Performa Pembangkit Listrik Tenaga Uap 200 MW PT. PJB Gresik. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh November
- Sahid, Bhudi Prasetyo. 2016. *Heat Rate* Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Baru (Unit 9) Berdasarkan *Performance Test* Tiap Bulan dengan Beban 100%. Semarang. Jurnal Teknik Energi, Vol 12 No 2.