

ANALISIS EFISIENSI *BOILER* MENGGUNAKAN METODE
TIDAK LANGSUNG DAN *HEAT RATE* PADA PT PLN
NUSANTARA POWER UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN
PUNAGAYA 2×100 MW UNIT 1



SKRIPSI

Ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan
diploma empat (D-4) Program Studi Teknik Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Ujung Pandang

AINUN ZAKINA
442 19 001

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2023

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul **Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tidak Langsung dan Heat Rate pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1** oleh Ainun Zakina NIM 442 19 001 telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik pada Program Studi D4 Teknik Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, 12 Agustus 2023

Pembimbing I



Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D.
NIP. 19600817 198903 1 002

Pembimbing II



Abdul Rahman, S.T., M.T.
NIP. 19730803 200604 1 001

Mengetahui,
Koordinator Program Studi D4 Teknik Pembangkit Energi



Ir. Chandra Bhuana, M.T.
NIP. 19650319 199103 1 003

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, Selasa 12 September 2023, tim penguji seminar skripsi telah menerima hasil skripsi oleh mahasiswa atas nama Ainun Zakina NIM 44219001 dengan judul “Analisis Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1”.

Makassar, 12 September 2023

Tim Penguji Seminar Skripsi:


1. Ir. Chandra Bhuana, M.T.

Ketua

(.....)



2. Prof. Dr. Ir. Firman, M.T.

Sekretaris

(.....)



3. Musrady Mulyadi, S.ST., M.T.

Anggota I

(.....)


4. Dr. Jamal, S.T., M.T.

Anggota II

(.....)


5. Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D. Pembimbing I

(.....)


6. Abdul Rahman, S.T., M.T.

Pembimbing II

(.....)


KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada *Allah Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Analisis Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1”. Salawat dan salam semoga tercurahkan kepada *Rasulullah Shallallahu 'Alaihi Wassallam* yang telah menjadi sebaik-baik panutan bagi umat manusia.

Terlaksana dan tersusunnya skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan, arahan, masukan dan bimbingan dari semua pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas segala berkah dan nikmat yang telah diberikan yaitu kesehatan, keselamatan, dan kelancaran dalam bekerja.
2. Kedua orang tua, saudara kandung penulis yang selalu memberikan dukungan berupa do'a, moral, dan finansial.
3. Bapak Ir. Ilyas Mansyur, M.T. selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang.
4. Bapak Yunan Kurniawan, S.T. selaku Manager PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan pengambilan data penelitian.
5. Bapak Dr. Ir. Syaharuddin Rasyid, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.

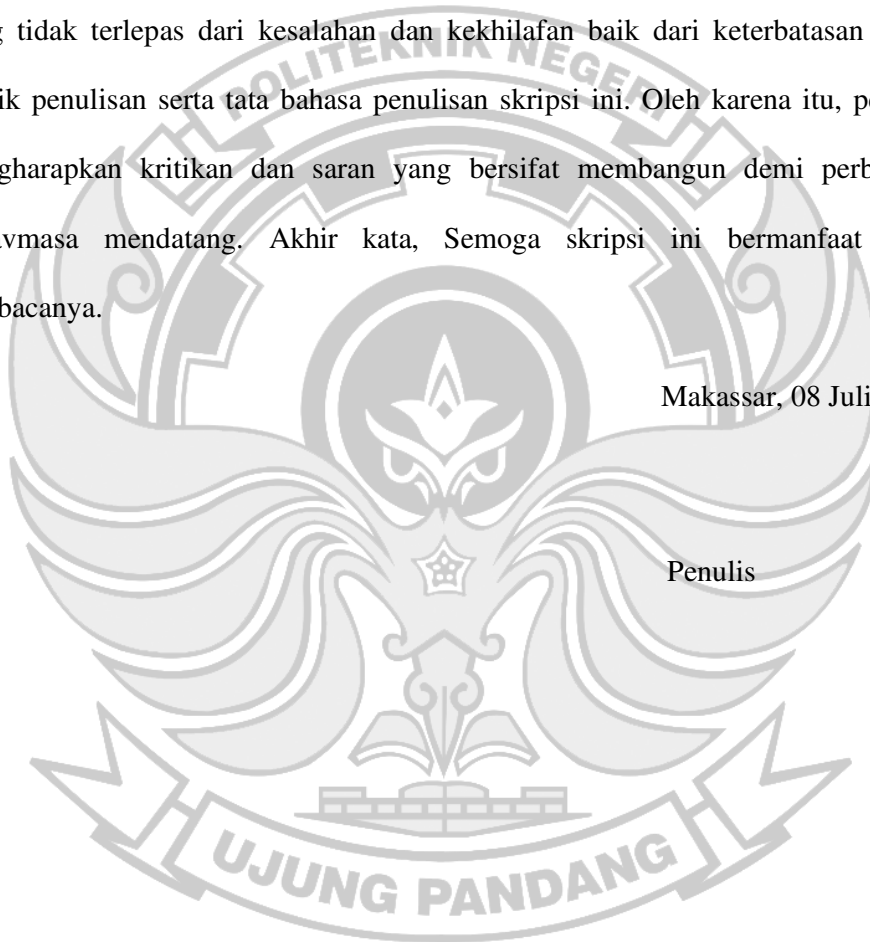
6. Bapak Ir. Chandra Buana, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang.
7. Bapak Tri Susilo, S.ST., M.T. selaku Wali Kelas 4A Teknik Pembangkit Energi Angkatan 2019.
8. Bapak Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D. selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Bapak Abdul Rahman, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Bapak Ashari Rizal, Bapak Bachrul dan Bapak Yoga yang telah membantu penulis dalam proses pengambilan data.
11. Segenap Dosen dan Staf Politeknik Negeri Ujung Pandang yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Kak Waqva yang selalu memberikan dukungan dan arahan kepada penulis.
13. Aulia, Fila dan Rafah selaku sahabat-sahabat penulis yang selalu setia menjadi pendengar dan selalu membantu penulis mulai dari mahasiswa baru hingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
14. Akhwat pengurus KAMUPI PNUP 2023 yang telah menjadi sahabat dan selalu memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

15. Rekan-rekan sesama Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya kelas 4A Teknik Pembangkit Energi angkatan 2019.

Selama penyusunan skripsi ini, penulis telah berusaha semaksimal mungkin dalam menyelesaikan penulisan ini. Namun penulis juga hanyalah manusia biasa yang tidak terlepas dari kesalahan dan kekhilafan baik dari keterbatasan ilmu, teknik penulisan serta tata bahasa penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi perbaikan padavmasa mendatang. Akhir kata, Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembacanya.

Makassar, 08 Juli 2023

Penulis



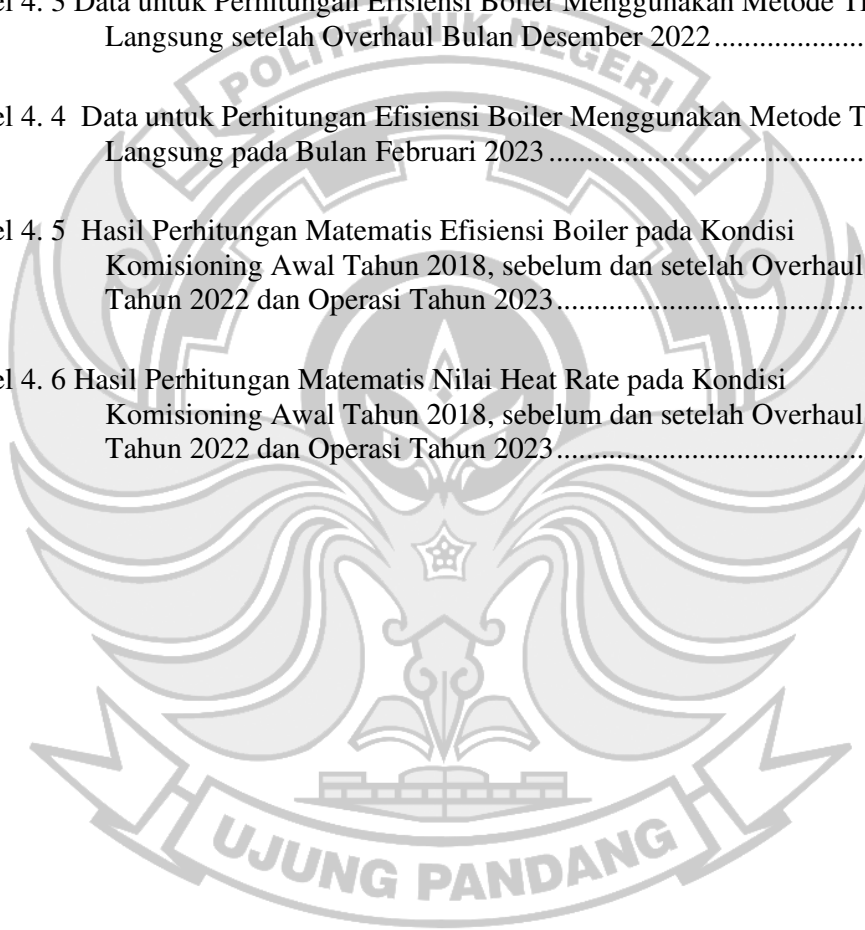
DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PENERIMAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR SIMBOL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
SURAT PERNYATAAN.....	xv
RINGKASAN	xvi
SUMMARY	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Sistem Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	7
2.3 Siklus <i>Rankine</i>	9
2.4 <i>Boiler</i>	12
2.5 Efisiensi <i>Boiler</i>	16

2.6	<i>Heat Rate</i>	20
BAB III METODE PENELITIAN.....		22
3.1	Tempat dan Waktu Pelaksanaan.....	22
3.2	<i>Software</i>	22
3.3	Teknik Pengumpulan Data	22
3.4	Data yang Diperlukan untuk Perhitungan	23
3.5	Teknik Analisis Data	24
3.6	Prosedur Penelitian.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Analisis Data Hasil Penelitian	32
4.1.1	Perhitungan Efisiensi <i>Boiler</i> menggunakan Metode Langsung dan <i>Heat Rate</i> pada saat Komisioning awal tahun 2018	32
4.1.2	Perhitungan Efisiensi <i>Boiler</i> Menggunakan Metode Tidak Langsung dan <i>Heat Rate</i> sebelum <i>Overhaul</i> Bulan Agustus 2022	33
4.1.3	Perhitungan Efisiensi <i>Boiler</i> Menggunakan Metode Tidak Langsung dan <i>Heat Rate</i> setelah <i>Overhaul</i> Bulan Desember 2022.....	39
4.1.4	Perhitungan Efisiensi <i>Boiler</i> menggunakan Metode Tidak Langsung dan <i>Heat Rate</i> Bulan Februari 2023	45
4.2	Grafik dan Pembahasan.....	51
4.2.1	Efisiensi <i>Boiler</i>	51
4.2.2	<i>Heat Rate</i>	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		62
5.1	Kesimpulan.....	62
5.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		64
LAMPIRAN.....		66

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data untuk Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung.....	32
Tabel 4. 2 Data untuk Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tidak Langsung sebelum Overhaul Bulan Agustus 2022.....	34
Tabel 4. 3 Data untuk Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tidak Langsung setelah Overhaul Bulan Desember 2022.....	40
Tabel 4. 4 Data untuk Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tidak Langsung pada Bulan Februari 2023.....	46
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Matematis Efisiensi Boiler pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah Overhaul Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023.....	52
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Matematis Nilai Heat Rate pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah Overhaul Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023.....	58



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Konversi Energi pada PLTU.....	8
Gambar 2. 2 Siklus Rankine.....	10
Gambar 2. 3 Diagram T-s dan Diagram h-s Siklus Rankine.....	10
Gambar 2. 4 Tata Letak Boiler CFB PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW.....	13
Gambar 2. 5 Boiler CFB PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1	15
Gambar 2. 6 Kehilangan Panas Yang Terjadi pada Boiler.....	18
Gambar 3. 1 Flowchart Prosedur Penelitian	31
Gambar 4. 1 Grafik Persentase Kehilangan Panas Boiler sebelum Overhaul pada Bulan Agustus 2022.....	38
Gambar 4. 2 Grafik Persentase Kehilangan Panas Boiler setelah Overhaul pada Bulan Desember 2022.....	44
Gambar 4. 3 Grafik Persentase Kehilangan Panas Boiler pada Bulan Februari 2023	50
Gambar 4. 4 Grafik Persentase Kehilangan Panas pada Kondisi sebelum dan setelah Overhaul Tahun 2022, dan Operasi Tahun 2023.....	53
Gambar 4. 5 Grafik Efisiensi Boiler pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah Overhaul Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023	57
Gambar 4. 6 Grafik Nilai Heat Rate pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah Overhaul Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023	59

DAFTAR SIMBOL

SIMBOL	SATUAN	KETERANGAN
η	%	Efisiensi <i>boiler</i>
m_s	kg/jam	Jumlah <i>steam</i> yang dihasilkan per jam
h_g	kCal/kg	Entalpi <i>superheated steam</i>
h_f	kCal/kg	Entalpi air umpan
m_f	kg/jam	Konsumsi bahan bakar yang digunakan per jam
HHV_{BB}	kCal/kg	<i>High Heating Value</i> atau nilai kalor bahan bakar
C	%	Nilai <i>carbon</i> dalam bahan bakar
H ₂	%	Nilai <i>hydrogen</i> dalam bahan bakar
O ₂	%	Nilai <i>oxygen</i> dalam bahan bakar
S	%	Nilai <i>sulphur</i> dalam bahan bakar
CO ₂	%	Nilai <i>carbon dioxide</i> dalam bahan bakar
EA	%	Kelebihan udara yang disuplai
AAS	kg /kg bahan bakar	Massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar
L1	%	Kehilangan panas karena gas buang kering
L2	%	Kehilangan panas karena pembentukan air dari H ₂ dalam bahan bakar
L3	%	Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar
L4	%	Kehilangan panas karena embun di udara
L5	%	Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna
L6	%	Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi
L7	%	Kehilangan panas karena <i>fly ash</i> yang tidak terbakar

L8	%	Kehilangan panas karena <i>buttom ash</i> yang tidak terbakar
m	kg/ kg bahan bakar	Massa gas buang kering dalam 1 kg bahan bakar
GCV	kCal/kg	<i>Gross Calorofic Value</i> atau nilai kalor bahan bakar
C _{pf}	kCal/kg°C	Panas spesifik gas buang
T _f	°C	Temperatur gas buang
T _a	°C	Temperatur udara sekitar
C _{ps}	kCal/kg°C	Panas spesifik dari superheated steam
M	kg/ kg bahan bakar	Massa uap air dalam 1 kg bahan bakar
CO	%	Persentase karbon monoksida dalam gas buang
A total	m ²	Luas total penampang <i>boiler</i>
V _m	m/s	Kecepatan angin
T _s	°C	Temperatur sekitar boiler
m _r	kg/ kg bahan bakar	Massa residu
h _{Fa}	kCal/kg	Entalpi <i>fly ash</i>
h _{Ba}	kCal/kg	Entalpi <i>bottom ash</i>
P _g	kW	Daya <i>output</i> generator

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai Heat Rate saat Komisioning Awal pada Bulan Mei 2018 dengan Beban Sebesar 100 MW	67
Lampiran 2	Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai Heat Rate sebelum Overhaul pada Bulan Agustus 2022 dengan Beban Sebesar 110 MW	69
Lampiran 3	Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai Heat Rate setelah Overhaul pada Bulan Desember 2022 dengan Beban Sebesar 105 MW	71
Lampiran 4	Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai <i>Heat Rate</i> pada Bulan Februari 2023 Beban 110 MW	73
Lampiran 5	Hasil Analisis Data Perhitungan Heat Rate Komisioning Awal pada Bulan Mei Tahun 2018 dengan Beban Sebesar 100 MW	75
Lampiran 6	Hasil Analisis Data Perhitungan Heat Rate sebelum Overhaul pada Bulan Agustus Tahun 2022 dengan Beban Sebesar 110 MW	77
Lampiran 7	Hasil Analisis Data Perhitungan Heat Rate setelah Overhaul pada Bulan Desember Tahun 2022 dengan Beban Sebesar 105 MW	79
Lampiran 8	Hasil Analisis Data Perhitungan Heat Rate pada Bulan Februari Tahun 2023 Beban 110 MW	81
Lampiran 9	Data <i>Overhaul Mean Inspection</i> #1 PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW	83
Lampiran 10	Salah Satu Perhitungan Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Tidak Langsung dan Heat Rate pada Microsoft Excel	86
Lampiran 11	Software dan Website Bantu yang Digunakan dalam Analisis Data	88
Lampiran 12	Surat Keterangan Pelaksanaan Penelitian.....	91

Lampiran 13 Data untuk Perhitungan Efisiensi Boiler dan Heat Rate yang diperoleh dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1 92

Lampiran 14 Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler dan Heat Rate dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1..... 98

Lembar Revisi 105



SURAT PERNYATAAN

Saya yang tertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ainun Zakina

Nim : 44219001

Menyatakan dengan sebenar-benarnya behawa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul “Analisis Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1” merupakan gagasan dan hasil karya saya dengan arahan pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apapun pada perguruan tinggi dan instansi manapun.

Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan oleh penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam skripsi ini.

Jika pernyataan tersebut di atas tidak benar, saya siap menanggung resiko yang telah ditetapkan oleh Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, 12 September 2023



Ainun Zakina
44219001

ANALISIS EFISIENSI *BOILER* MENGGUNAKAN METODE TIDAK LANGSUNG DAN *HEAT RATE* PADA PT PLN NUSANTARA POWER UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN PUNAGAYA 2×100 MW UNIT 1

RINGKASAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW yang berlokasi di Desa Punagaya, Sulawesi Selatan merupakan PLTU berbahan bakar batu bara yang berdiri sejak tahun 2018. Dengan masa operasi selama 6 tahun tentu akan mengalami penurunan kinerja. Kinerja suatu PLTU dapat dievaluasi dengan mengetahui efisiensi *boiler* dan juga nilai *heat rate*. Efisiensi *boiler* dengan menggunakan metode tidak langsung berdasarkan standar ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units akan memberikan informasi mengenai berbagai kehilangan panas yang terjadi di dalam *boiler* yang dapat memudahkan dalam mengidentifikasi opsi-opsi untuk melakukan perbaikan demi meningkatkan kinerja PLTU yang berdampak pada peningkatan efisiensi *boiler*. Kinerja suatu PLTU juga dapat dievaluasi dengan pengujian *heat rate*, semakin bagus kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap, maka nilai *heat rate* akan semakin kecil.

Dalam penelitian ini, nilai efisiensi *boiler* ditentukan dengan persamaan $\eta = 100\% - \text{Total Losses}$. Total *losses* yang terjadi berupa kehilangan panas dalam gas buang kering, kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂, kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar, kehilangan panas karena embun di udara, kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna, kehilangan panas karena radiasi dan konveksi, kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar, dan kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar. Sedangkan untuk menentukan nilai *heat rate* dibutuhkan data berupa konsumsi bahan bakar per jam, nilai kalor bahan bakar, dan daya *output* generator.

Hasil penelitian diperoleh bahwa nilai efisiensi *boiler* pada komisioning awal tahun 2018 sebesar 86,59%, namun sebelum dilakukan *overhaul* tahun 2022 nilai efisiensinya mengalami penurunan sebesar 0,64%, dan setelah dilakukan *overhaul* mengalami peningkatan sebesar 0,01%, kemudian pada kondisi saat ini di tahun 2023 kembali mengalami penurunan sebesar 0,12%. Penurunan efisiensi *boiler* yang terjadi disebabkan oleh 3 faktor utama yaitu kehilangan panas dalam gas buang kering, kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂ dalam bahan bakar dan kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar. Sementara nilai rata-rata *heat rate* pada komisioning awal tahun 2018 bernilai 10385,749 kJ/kWh, namun pada saat sebelum dilakukan *overhaul* tahun 2022 nilainya mengalami peningkatan sebesar 1421,07 kJ/kWh, dan setelah dilakukan *overhaul* mengalami penurunan sebesar 716,785 kJ/kWh, kemudian pada kondisi saat ini di tahun 2023 mengalami peningkatan sebesar 2164,786 kJ/kWh.

Kata kunci: efisiensi; *boiler*; metode tidak langsung; *heat rate*.

BOILER EFFICIENCY ANALYSIS USING INDIRECT METHOD AND HEAT RATE AT PT PLN NUSANTARA POWER UNIT IMPLEMENTING PUNAGAYA POWER PLANT 2×100 MW UNIT 1

SUMMARY

Punagaya 2x100 MW Steam Power Plant (PLTU) located in Punagaya Village, South Sulawesi is a coal-fired power plant that was established in 2018. With an operating period of 6 years, it will certainly experience a decline in performance. The performance of a PLTU can be evaluated by knowing the boiler efficiency and also the heat rate value. Boiler efficiency using the indirect method based on the ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units standard will provide information on various heat losses that occur in the boiler which can make it easier to identify options for making improvements to improve PLTU performance which has an impact on increasing boiler efficiency. The performance of a PLTU can also be evaluated by testing the heat rate, the better the performance of a Steam Power Plant, the smaller the heat rate value will be.

In this study, the value of boiler efficiency is determined by the equation $\eta = 100\% - \text{Total Losses}$. Total losses that occur in the form of heat loss in dry flue gas, heat loss due to the formation of water from H₂, heat loss due to dew in fuel, heat loss due to dew in the air, heat loss due to incomplete combustion, heat loss due to radiation and convection, heat loss due to unburned fly ash, and heat loss due to unburned bottom ash. Meanwhile, to determine the heat rate value, data is needed in the form of hourly fuel consumption, fuel calorific value, and generator output power.

The results showed that the boiler efficiency value at the initial commissioning in 2018 was 86.59%, but before the overhaul in 2022 the efficiency value decreased by 0.64%, and after the overhaul it increased by 0.01%, then in the current condition in 2023 it decreased again by 0.12%. The decrease in boiler efficiency that occurs is caused by 3 main factors, namely heat loss in dry flue gas, heat loss due to the formation of water from H₂ in fuel and heat loss due to dew in fuel. While the average value of heat rate at the initial commissioning in 2018 was 10385.749 kJ/kWh, but before the overhaul in 2022 the value increased by 1421.07 kJ/kWh, and after the overhaul decreased by 716.785 kJ/kWh, then in the current condition in 2023 it increased by 2164.786 kJ/kWh.

Keywords: efficiency; boiler; indirect method; heat rate.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber energi yang beraneka ragam seperti minyak bumi, tenaga air, gas alam, batu bara, panas bumi dan sebagainya. Kebutuhan energi merupakan hal yang sangat penting bagi kehidupan manusia untuk dapat meningkatkan kesejahteraan hidupnya. Salah satu kebutuhan energi yang hampir tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan manusia adalah kebutuhan energi listrik. Pemanfaatan energi listrik di era perkembangan ekonomi yang terus meningkat telah digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, komersil, instansi-instansi pemerintah, industri, dan sebagainya. Mengingat peran penting dari ketersediaan energi listrik, maka salah satu cara yang dilakukan adalah dengan membangun pusat-pusat tenaga listrik. Pembangkit listrik di Indonesia sendiri, masih memprioritaskan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) karena biayanya yang dianggap murah dan tingkat kestabilannya cukup tinggi dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utamanya. Proses pembakaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap akan menghasilkan panas yang digunakan untuk memanaskan air di dalam *boiler* atau ketel uap. *Boiler* adalah suatu bejana atau tangki bertekanan tinggi yang berfungsi untuk menghasilkan uap panas atau *steam* (Kharisma dan Arif Budiman, 2020). Uap panas yang dihasilkan *boiler* akan digunakan sebagai penggerak utama turbin yang dikopel dengan generator untuk

menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, efisiensi *boiler* akan mempengaruhi efisiensi energi listrik yang dihasilkan suatu pembangkitan.

Efisiensi *boiler* merupakan salah satu hasil dari kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Selain kemampuan kerja suatu peralatan, kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap juga dapat dinilai dengan melihat bagaimana parameter-parameter yang mendukung kualitas *input* dan *output boiler*. Semakin bagus kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap, maka semakin bagus pula efisiensi *boiler* yang dihasilkan.

Efisiensi *boiler* dapat ditentukan dengan dua metode yaitu metode langsung (*input & output heat method*) dan metode tidak langsung (*heat loss method*) (Hendri dkk., 2017). Perhitungan efisiensi *boiler* menggunakan metode langsung akan memberikan nilai efisiensi *boiler* secara langsung. Namun, penyebab dari inefisiensi yang terjadi tidak dapat diketahui. Untuk itu, diperlukan metode tidak langsung sesuai standar ASME PTC-4-1 *Power Test Code Steam Generating Units* untuk mengetahui berbagai kehilangan panas yang terjadi dalam *boiler* yang dapat memudahkan dalam mengidentifikasi opsi-opsi untuk melakukan perbaikan demi meningkatkan efisiensi *boiler*.

Kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap juga dapat dievaluasi dengan pengujian *heat rate*. *Heat rate* akan menunjukkan berapa besar energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Semakin bagus kinerja suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap, maka nilai *heat rate* akan semakin kecil.

Salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang berada di Sulawesi Selatan adalah Unit Pelaksana Pembangkitan (UPK) Punagaya yang dikelola oleh PT PLN Nusantara Power berlokasi di Desa Punagaya, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto, Provinsi Sulawesi Selatan yang memiliki 2 unit pembangkit dengan kapasitas produksi 2x100 MW. Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW telah beroperasi sejak tahun 2018. Dengan masa operasi selama 6 tahun, diperkirakan akan terjadi penurunan kinerja sehingga menyebabkan efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap akan mengalami penurunan dan nilai *heat rate* mengalami peningkatan.

Berdasarkan hal tersebut, maka penulis melakukan suatu penelitian yang berjudul “Analisis Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah yang diperoleh sebagai berikut:

1. Berapa besar penurunan efisiensi *boiler* yang disebabkan oleh penurunan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap di PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1?
2. Berapa besar *heat rate* yang terjadi pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka diperlukan adanya batasan masalah agar analisis yang dilakukan nantinya tidak melebar dan memudahkan dalam melakukan analisis. Adapun batasan masalah tersebut yaitu:

1. Pengambilan data hanya terfokus pada Unit 1 PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya.
2. Tidak melakukan perhitungan efisiensi pada bagian tiap-tiap alat.
3. Analisis dilakukan berdasarkan data-data operasi pada saat komisioning awal tahun 2018, sebelum dan setelah dilakukan *overhaul* tahun 2022, serta data operasi terkini tahun 2023.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui besarnya penurunan efisiensi *boiler* yang disebabkan oleh penurunan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap di PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1.
2. Untuk mengetahui besarnya *heat rate* yang terjadi pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mengetahui kelebihan dan kekurangan dari metode perhitungan yang digunakan.
2. Memberikan kontribusi kepada perusahaan berupa informasi efisiensi *boiler* dan nilai *heat rate* yang dapat dijadikan sebagai bahan masukan untuk mengevaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap.
3. Sebagai bahan referensi yang menjadi acuan bagi pembaca untuk pengembangan ilmu yang berkaitan dengan efisiensi *boiler* dan *heat rate*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Telah banyak dilakukan penelitian mengenai analisis efisiensi *boiler* menggunakan metode tidak langsung oleh para peneliti, salah satunya adalah Hendri, dkk (2017) yang menyajikan analisis efisiensi *boiler* dengan metode *head loss* untuk mengidentifikasi performa efisiensi *boiler* sebelum dan sesudah *overhaul* pada PT Indonesia Power UBP PLTU Lontar Unit 3. Analisis efisiensi *boiler* dilakukan dengan metode kerugian panas dan diagram *Sankey*. Dari hasil analisis tersebut diketahui bahwa presentasi kehilangan panas terbesar yang mempengaruhi efisiensi *boiler* terjadi pada kehilangan panas karena gas buang kering (6,01% - 6,11%), kehilangan panas karena *moisture* dalam bahan bakar (4,9% - 5,1%), dan kehilangan panas karena pembakaran *hydrogen* (3,9% - 5,0%).

Dwi, dkk (2019) juga melakukan penelitian mengenai efisiensi *boiler* untuk memperoleh penyebab terjadinya penurunan efisiensi *boiler*. Penelitian ini menunjukkan besar efisiensi *boiler* yang dihasilkan adalah 78% dengan penyebab penurunan efisiensi *boiler* dikarenakan kehilangan panas karena bahan bakar batu bara yang basah atau adanya embun dalam batu bara pada saat digunakan.

Penelitian mengenai efisiensi *boiler* dengan metode tidak langsung juga dilakukan oleh Zaman dan Sinaga Nazaruddin (2021), yang menganalisis kerugian termal pada *boiler* dengan membandingkan nilai efisiensi *boiler* saat komisioning (86,92%) dengan uji kinerja terkini (82,625%). Dari hasil analisis tersebut, penurunan efisiensi *boiler* disebabkan adanya peningkatan kehilangan panas akibat gas kering, kandungan hidrogen dalam batu bara, dan pembakaran tidak sempurna.

Karaeng, dkk (2012) juga telah melakukan penelitian mengenai kinerja *boiler* pada PLTU Unit 1 PT Semen Tonasa. Penelitian ini menyimpulkan bahwa Efisiensi *boiler* PT Semen Tonasa mengalami penurunan sebesar 6,04% dengan masa operasi dari tahun 1997 hingga tahun 2012. Adapun faktor-faktor yang menyebabkan penurunan efisiensi *boiler* yaitu, nilai kalor dari batu bara, kandungan air dalam batu bara, temperatur gas buang kering, temperatur udara pembakaran, dan umur pakai (*life time*) dari *boiler*.

Berbeda dari peneliti lainnya, Aziz dan Andi Rinaldi Hasan (2015) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi *heat rate* dan efisiensi boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap berkapasitas 300 MW. Penelitian ini menampilkan nilai efisiensi *boiler* yang mengalami penurunan dibandingkan hasil komisioning, dan nilai *heat rate* lebih besar 3,28% dibandingkan hasil komisioning.

Berdasarkan jurnal yang telah dipaparkan, maka terbukti bahwa analisis efisiensi *boiler* menggunakan metode tidak langsung akan menunjukkan besar kehilangan panas yang terjadi pada *boiler*, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengambilan langkah pencegahan untuk menjaga efisiensi *boiler* agar tetap dalam keadaan baik yang berdampak pada peningkatan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Kemudian kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap dapat dievaluasi dengan pengujian nilai *heat rate*.

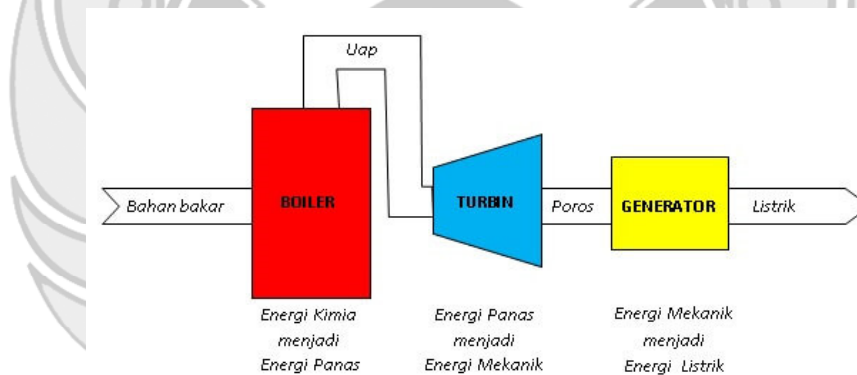
2.2 Sistem Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan uap panas sebagai penggerak utama turbin untuk menghasilkan energi listrik. Uap panas yang digunakan berasal dari proses penguapan air melalui

boiler. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar batu bara maupun bahan bakar minyak untuk memanaskan air.

PLTU merupakan pembangkit listrik yang mengonversi energi kimia pada bahan bakar menjadi energi listrik. Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui tiga tahapan, yaitu:

1. Energi kimia pada bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan serta temperatur tinggi.
2. Energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.
3. Energi mekanik diubah menjadi energi listrik.



Gambar 2. 1 Proses Konversi Energi pada PLTU
(Sumber: Rakhman, 2013)

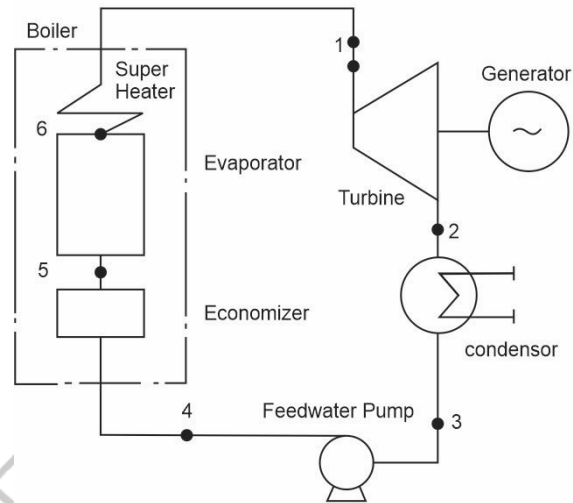
Sistem kerja PLTU adalah dengan menggunakan fluida kerja air yang bersirkulasi secara tertutup, artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang (Rakhman, 2013). Urutan siklusnya secara singkat adalah sebagai berikut:

1. Air disuplay ke *boiler* hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan perpindahan panas. Di dalam *boiler* air dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap.

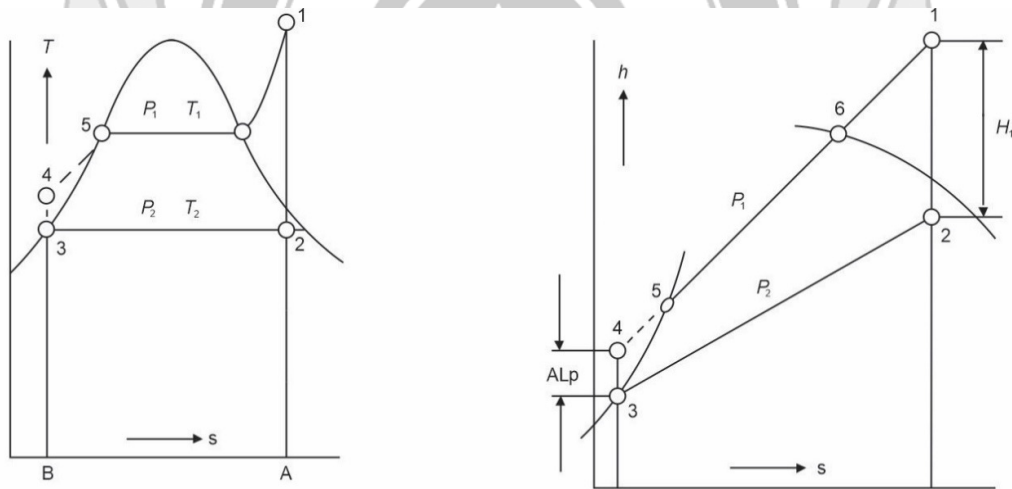
2. Uap hasil produksi *boiler* dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.
3. Generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari putaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal output generator.
4. Uap bekas keluaran turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi *boiler*.
5. Demikian siklus ini berulang terus menerus dan berulang-ulang.

2.3 Siklus Rankine

Semua Pembangkit Listrik Tenaga Uap bekerja berdasarkan prinsip kerja siklus *Rankine*. Siklus *Rankine* adalah siklus daya uap yang digunakan untuk menghitung atau memodelkan proses kerja mesin uap atau turbin uap. Siklus ini bekerja dengan fluida kerja air dan mengalami siklus tertutup. Artinya, secara konstan air pada akhir proses siklus masuk kembali ke proses awal siklus.



Gambar 2. 2 Siklus Rankine
(Sumber: aeroengineering.co.id/, 2022)



Gambar 2. 3 Diagram T-s dan Diagram h-s Siklus Rankine
(Sumber: aeroengineering.co.id/, 2022)

Kondisi fluida dan energi *input* dan *output* pada setiap bagian dari Siklus Rankine ditunjukkan pada grafik T-s dan grafik h-s, dimana T adalah suhu mutlak, h adalah entalpi, dan s adalah entropi.

Berikut merupakan 4 proses perubahan kondisi fluida yang terjadi dalam siklus *Rankine*.

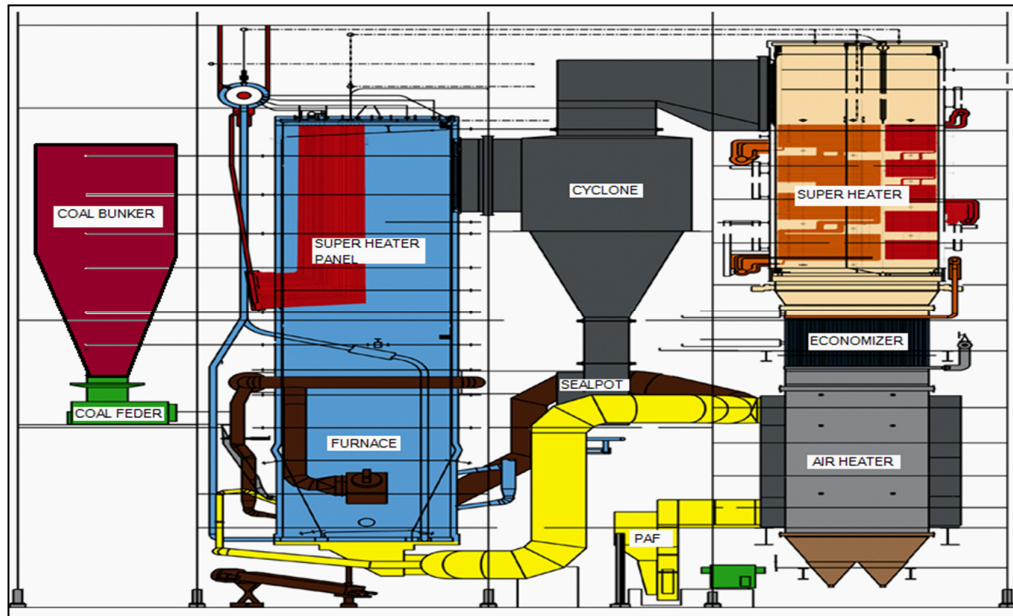
1. Proses 3-4: Fluida kerja atau air dipompa dari tekanan rendah ke tinggi, pada proses ini fluida kerja masih berfase cair sehingga tidak membutuhkan input tenaga yang terlalu besar. Proses ini dinamakan proses kompresi isentropik karena saat air dipompa, secara ideal tidak ada perubahan entropi yang terjadi.
2. Proses 4-1: Air bertekanan tinggi tersebut masuk ke *boiler* untuk mengalami proses selanjutnya, yaitu dipanaskan secara isobarik (tekanan konstan). Sumber panas didapatkan dari pembakaran batu bara. Di dalam *boiler*, air mengalami perubahan fase dari cair, campuran air dan uap, serta uap kering.
3. Proses 1-2: Proses ini terjadi pada turbin uap. Uap kering dari *boiler* masuk ke turbin dan mengalami proses ekspansi secara isentropik. Energi yang tersimpan di dalam uap dikonversi menjadi energi gerak pada turbin.
4. Proses 2-3: Uap air yang keluar dari turbin uap masuk ke kondensor dan mengalami kondensasi secara isobarik. Fase uap air berubah menjadi cair kembali sehingga dapat digunakan kembali pada proses siklus.

2.4 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah peralatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap dilakukan dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan panas hasil pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran dilakukan secara kontinu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

Pada Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW menggunakan *boiler* jenis CFB (*Circulating Fluidized Bed*) yaitu *boiler* dengan karakteristik batu bara 8-10 mm. *Circulating* yaitu terjadinya sirkulasi batu bara yang belum habis terbakar dari *furnace* ke *cyclone* kemudian masuk ke *seal pot* dan kembali ke *furnace*. *Fluidized* yaitu penghambusan udara primer untuk menjaga *material bed* dan batu bara tetap melayang di dalam *furnance*. *Bed* yaitu material berupa partikel-partikel kecil (pasir kuarsa) yang digunakan sebagai media transfer panas dari pembakaran HSD (*High Solar Diesel*) ke pembakaran batu bara.

Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW menggunakan jenis boiler *Water Tube*, dimana air dipanaskan di dalam sebuah pipa kemudian mendapatkan pemanas dari gas-gas panas yang berada di sekitar pipa. Sedangkan bahan bakar yang digunakan adalah batu bara jenis *Low Rank* dengan nilai kalor sebesar 4200 kCal/kg atau 17573 kJ/kg.



Gambar 2. 4 Tata Letak *Boiler CFB* PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW
(Sumber: PLN Corporate University)

Peralatan utama pada *boiler* PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW terdiri dari:

1. *Furnance* (ruang bakar)

Furnance merupakan tempat terjadinya pembakaran bahan bakar batu bara yang akan menjadi sumber panas. Proses penerimaan panas oleh media air dilakukan melalui pipa yang telah dialiri air, pipa tersebut menempel pada dinding tungku pembakaran.

2. *Cyclone*

Cyclone berfungsi untuk memisahkan batu bara yang belum habis terbakar dengan abu (*ash*) sisa pembakaran dan mengembalikannya ke *furnace* dengan bantuan *High Pressure Fluidized Fan* (HPFF).

3. Dinding Pipa (*Wall Tubes*)

Dinding pada ruang bakar yang berfungsi untuk penguapan air, dinding ini berupa pipa-pipa yang berisi air yang berjajar vertikal.

4. *Economizer*

Fungsi *Economizer* pada *boiler* adalah untuk memanaskan air pengisi *boiler* dengan memanfaatkan panas dari gas sisa pembakaran di dalam *boiler*.

5. *Steam Drum*

Steam Drum berfungsi sebagai tempat penampungan air dan uap air dari *economizer*.

6. *Superheater*

Superheater merupakan alat ini digunakan untuk memanaskan uap jenuh yang keluar dari *drum* uap sehingga mencapai tingkat keadaan uap panas lanjut atau sering disebut uap kering (*superheated steam*).

7. *Burner*

Burner terdiri atas *Lower Burner* dan *Upper Burner*. *Lower Burner* adalah salah satu komponen dari *boiler* yang berfungsi sebagai tempat pembakaran awal yang dibantu oleh tekanan udara dari *Primary Air Fan (PA Fan)* sehingga terjadi pembakaran di dalam ruang bakar. Sedangkan *upper burner* digunakan pada keadaan dimana suhu pembakaran kurang karena pengaruh iklim seperti salju



Gambar 2. 5 *Boiler CFB* PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1
(Sumber: Penulis, 2022)

Spesifikasi *Boiler CFB* Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW

Manufacture : Wuxi Huaguang Boiler CO. LTD.

Model : UG-443/9.3-M

Nominal Operating Pressure : 9.3 MPa

Nominal Capacity : 443 t/h

Nominal Steam Temperature : 540°C

2.5 Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler digunakan untuk mengukur seberapa besar kemampuan boiler dalam mengonversi nilai energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas. Efisiensi boiler didefinisikan persentase jumlah masukan panas efektif yang digunakan untuk menghasilkan uap (Hendri dkk., 2017). Ada dua metode yang biasa digunakan untuk menentukan efisiensi boiler yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Metode langsung dikenal juga sebagai *Input & Output Method* karena dalam metode ini, perhitungan efisiensi boiler hanya memerlukan output dan input evaluasi efisiensi. Metode langsung merupakan perbandingan antara energi yang terkandung dalam steam atau uap panas dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler (Nurhasanah, 2015). Hendri dkk. (2017) menyatakan bahwa untuk menghitung efisiensi boiler metode langsung, digunakan standar *The American Society of Mechanical Engineers Performance Test Codes* (ASME PTC-4-1) yang didasarkan pada nilai *Gross Calorific Value* (GCV) bahan bakar yaitu sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\eta = \frac{m_s \times (h_g - h_f)}{m_f \times \text{GCV}_{\text{BB}}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

η = Efisiensi boiler (%)

m_s = Jumlah steam yang dihasilkan per jam (kg/jam)

h_g = Entalpi *superheated steam* (kCal/kg)

h_f = Entalpi air umpan (kCal/kg)

m_f = Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam)

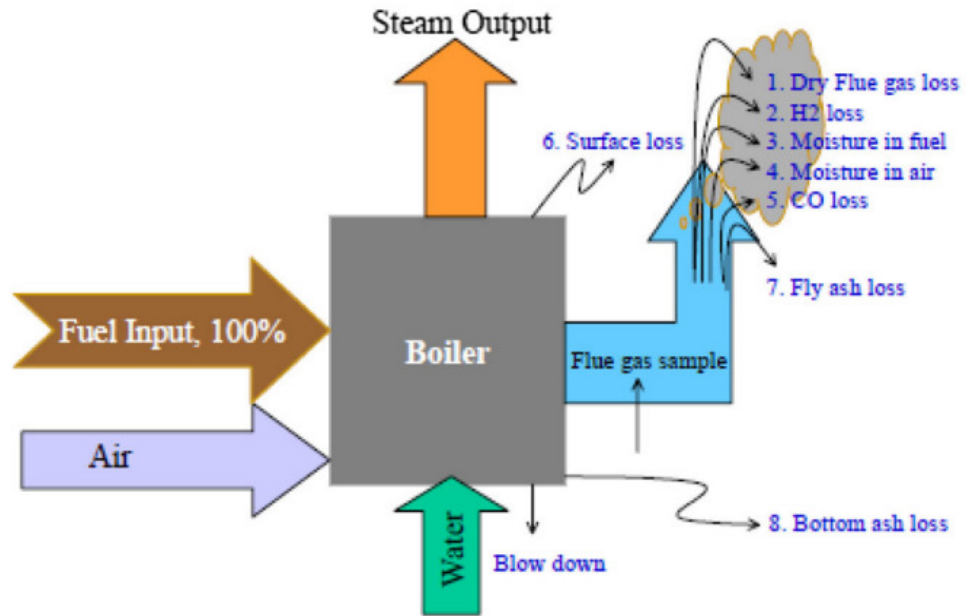
GCV_{BB} = *High Heating Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

Gross Calorific Value (GCV) adalah tipe nilai kalor pada setiap bahan bakar yang dihasilkan dari pembakaran sempurna batu bara pada volume konstan sehingga semua air (H_2O) terkondensasi dalam bentuk cairan. *Gross Calorific Value* (GCV) disebut juga *High Heating Value* (HHV) (Gunawan dan Bambang Ali G, 2020).

Metode langsung akan memberikan nilai efisiensi *boiler* secara langsung yang dapat dievaluasi. Tetapi metode ini tidak memberikan petunjuk tentang penyebab dari efisiensi yang lebih rendah (Purba, 2020). Kekurangan dari metode langsung dapat diatasi dengan metode tidak langsung, yang menghitung berbagai kehilangan panas yang terkait dengan *boiler* (Nagar dkk., 2013). Metode tidak langsung adalah selisih masukan energi dengan rugi-rugi atau kehilangan panas. Metode tidak langsung disebut juga sebagai *Heat Loss Method* atau metode kehilangan panas. Efisiensi *boiler* dalam metode tidak langsung dapat dicapai dengan mengurangi fraksi kehilangan panas dari 100.

Energi yang masuk *boiler* merupakan energi yang berasal dari bahan bakar. Fraksi kehilangan panas yang terjadi dalam *boiler* yaitu kehilangan panas dalam gas buang kering, kehilangan panas karena pembentukan air dari H_2 dalam bahan bakar, kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar, kehilangan panas karena embun di udara, kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna, kehilangan panas karena radiasi dan konveksi, kehilangan

panas karena *fly ash* dan *bottom ash* yang tidak terbakar (Pravitasari dkk., 2017).



Gambar 2. 6 Kehilangan Panas Yang Terjadi pada Boiler
(Sumber: A.A Nuraini dkk., 2018)

Rijal dan Masykur (2022) menyatakan bahwa untuk menghitung efisiensi boiler metode tidak langsung, digunakan standar *The American Society of Mechanical Engineers, Performance Test Codes* (ASME PTC-4-1) yaitu sebagai berikut:

$$\eta = 100\% - \text{Total Losses} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\eta = 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \dots\dots\dots (2.4)$$

Penjelasan mengenai berbagai kehilangan panas yang terjadi pada *boiler* dikemukakan oleh Sahid (2016) di bawah ini:

L1 = Kehilangan panas dalam gas buang kering

Merupakan kehilangan panas yang terbawa oleh gas buang kering keluar dari cerobong *boiler*.

L2 = Kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂

Merupakan bahan bakar adalah kehilangan panas yang diakibatkan adanya hidrogen yang menyebabkan timbulnya air, sehingga untuk setiap kg air yang terkandung dalam bahan bakar diperlukan sejumlah panas untuk mengubahnya menjadi uap dan keluar bersama gas buang ke cerobong.

L3 = Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

Merupakan kehilangan panas yang diakibatkan oleh bahan bakar yang digunakan mengandung air.

L4 = Kehilangan panas karena embun di udara

Merupakan kehilangan panas akibat besarnya kandungan air di dalam udara yang digunakan sebagai udara pembakaran.

L5 = Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

Salah satu unsur yang terkandung dalam batu bara adalah karbon, sehingga kehilangan panas karena pembakaran yang tidak sempurna diakibatkan oleh konversi sebagian C menjadi CO.

L6 = Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

Merupakan kehilangan panas yang diakibatkan oleh adanya perpindahan panas berupa radiasi dan konveksi dari dinding *boiler*.

L7 = Kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

Merupakan kehilangan panas yang ditunjukkan oleh adanya limbah *fly ash* dari pembakaran batu bara yang tidak ikut terbakar.

L8 = Kehilangan panas karena *buttom ash* yang tidak terbakar

Merupakan kehilangan panas yang ditunjukkan oleh adanya limbah *buttom ash* dari pembakaran batu bara yang tidak ikut terbakar.

2.6 Heat Rate

Heat rate pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. *Heat rate* adalah kebalikan dari efisiensi, *heat rate* yang lebih rendah berarti suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap semakin efisien (Aziz dan Andi Rinaldi Hasan, 2015). Akan tetapi, nilai *heat rate* akan mengalami kenaikan dibandingkan dengan kondisi awal unit pembangkit yang dioperasikan secara terus menerus.

Pengujian *heat rate* dilakukan untuk mengetahui berapa besar input energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan listrik sebesar 1 kWh (Jamaluddin dan Reza Pangestu DH, 2018). Untuk menghitung nilai *heat rate*, maka digunakan metode energi input dan energi output.

Perhitungan *heat rate* metode energi input dan energi output merupakan cara untuk mengetahui nilai *heat rate* yang paling mudah. Metode ini memiliki kelebihan untuk mengetahui nilai *heat rate* secara cepat karena hanya

membutuhkan parameter nilai kalor bahan bakar, jumlah bahan bakar yang digunakan dan daya yang mampu dihasilkan generator (Isfandi, tahun tidak dicantumkan).

Aziz dan Andi Rinaldi Hasan (2015) menyatakan bahwa untuk menghitung *heat rate*, digunakan standar *The American Society of Mechanical Engineers, Performance Test Codes (ASME PTC 6) on Steam Turbine* yaitu sebagai berikut:

$$\text{Heat Rate} = \frac{m_f \times \text{GCV}_{\text{BB}}}{P_g} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

Heat rate (kJ/kWh)

m_f = Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam)

GCV_{BB} = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

P_g = Daya *output* generator (kW)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Tempat penelitian dilakukan di PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan (UPK) Punagaya 2x100 MW berlokasi di Desa Punagaya, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto, Provinsi Sulawesi Selatan. Waktu pelaksanaan penelitian ini dilakukan mulai 6 Maret – 6 April 2023.

3.2 Software

Software yang digunakan untuk melakukan analisis data adalah *Microsoft Excel* 2019. *Microsoft Excel* adalah program aplikasi dari *microsoft* yang digunakan untuk mengolah angka. Penyajian dan pengolahan data pada *Microsoft Excel* dilakukan secara cepat dan akurat untuk keperluan informasi kuantitatif seperti angka, tabel dan grafik.

Sobri (2017) menyatakan bahwa *Microsoft Excel* juga memiliki beberapa kelebihan seperti bentuk tampilan yang mudah dikenali dan dijalankan, memiliki fitur untuk membuat grafik data, kemampuan penyimpanan data cukup besar, serta cukup mudah dioperasikan dengan menggunakan rumus dan logika dalam *Excel*.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Adapun teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

1. Studi Literatur

Melakukan studi literatur dengan mencari dan mengumpulkan informasi pada buku dan jurnal yang terkait dengan teori serta data-data yang

dibutuhkan untuk menganalisis efisiensi *boiler* menggunakan metode tidak langsung dan *heat rate* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

2. Metode Observasi

Melakukan pengamatan secara langsung ke lapangan untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan dan terkait.

3. Metode Wawancara

Melakukan wawancara atau tanya jawab secara langsung pihak pekerja instansi/perusahaan terkait data-data yang dibutuhkan untuk mendapatkan keterangan dan penjelasan yang lebih detail.

3.4 Data yang Diperlukan untuk Perhitungan

Adapun data-data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi *boiler* menggunakan metode tidak langsung dan perhitungan *heat rate* adalah:

1. Analisis *ultimate* bahan bakar (H_2 , O_2 , S, C)
2. Analisis *proximate* massa uap air (kg/kg bahan bakar)
3. Nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)
4. Massa gas buang kering (kg/kg bahan bakar)
5. Persentase O_2 atau CO_2 dalam gas buang
6. Persentase CO dalam gas buang yang keluar dari *economizer*
7. Panas spesifik gas buang (kCal/kg $^{\circ}C$)
8. Panas spesifik dari superheated steam (kCal/kg $^{\circ}C$)
9. Temperatur gas buang ($^{\circ}C$)
10. Temperatur udara sekitar ($^{\circ}C$)
11. Kelembaban udara (kg/kg udara kering)

12. Kecepatan angin (m/s)
13. Temperatur sekitar *boiler* (°C)
14. Luas total penampang *boiler* (m²)
15. Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam)
16. Massa residu (kg/kg bahan bakar)
17. Entalpi *fly ash* (kCal/kg)
18. Entalpi *bottom ash* (kCal/kg)
19. *Fly ash split*
20. *Bottom ash split*
21. Daya *output* generator (kW)

3.5 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang dilakukan adalah perhitungan matematis menggunakan panduan *American Standar ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units* untuk mengetahui efisiensi *boiler*. Data yang sudah terkumpul diolah secara manual dan menggunakan *Microsoft Excel 2019* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Berdasarkan panduan *American Standar ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units*, perhitung-perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\text{Kebutuhan udara teoritis} = \frac{[(11.6 \times C) + (34.8 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)) + (4.35 \times S)]}{100 \text{kg/ kg bahan bakar}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:

Kebutuhan udara teoritis (kg/kg bahan bakar)

C = Nilai *carbon* dalam bahan bakar (%)

H₂ = Nilai *hydrogen* dalam bahan bakar (%)

O₂ = Nilai *oxygen* dalam bahan bakar (%)

S = Nilai *sulphur* dalam bahan bakar (%)

2. Menghitung persen kelebihan udara yang disuplai (EA)

$$EA = \frac{\% O_2}{(21 - \% O_2)} \times 100\% \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana:

EA = Kelebihan udara yang disuplai (%)

Pengukuran yang dianjurkan adalah O₂. Jika O₂ tidak tersedia, maka gunakan pengukuran CO₂ (A.A Nuraini dkk., 2018).

3. Menghitung massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AAS)

$$AAS = \left\{ 1 + \frac{EA}{100} \right\} \times \text{kebutuhan udara teoritis} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana:

AAS = Massa udara sebenarnya (kg/kg bahan bakar)

EA = Kelebihan udara yang disuplai (%)

4. Menghitung total *losses* (seluruh kehilangan panas)

$$= (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \dots\dots\dots (3.4)$$

1) Kehilangan panas karena gas buang kering

$$L1 = \frac{m \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana:

m = Massa gas buang kering dalam 1 kg bahan bakar (kg/kg bahan bakar)

C_{pf} = Panas spesifik gas buang (kCal/kg°C)

T_f = Temperatur gas buang (°C)

T_a = Temperatur udara sekitar (°C)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

2) Kehilangan panas karena pembentukan air dari H_2 dalam bahan bakar

$$L2 = \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana:

H_2 = Kandungan hidrogen dalam 1 kg bahan bakar

584 = Panas laten yang sesuai dengan tekanan parsial uap air

C_{ps} = Panas spesifik dari superheated steam (kCal/kg°C)

T_f = Temperatur gas buang (°C)

T_a = Temperatur udara sekitar (°C)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

3) Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

$$L3 = \frac{M \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana:

M = Massa uap air dalam 1 kg bahan bakar (kg/kg bahan bakar)

584 = Panas laten yang sesuai dengan tekanan parsial uap air

C_{ps} = Panas spesifik dari superheated steam (kCal/kg°C)

T_f = Temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = Temperatur udara sekitar ($^{\circ}\text{C}$)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

4) Kehilangan panas karena embun di udara

$$L4 = \frac{\text{AAS} \times \text{Faktor Kelembaban} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana:

AAS = Massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar

Faktor kelembaban (kg/kg udara kering)

C_{ps} = Panas spesifik dari superheated steam (kCal/kg $^{\circ}\text{C}$)

T_f = Temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = Temperatur udara sekitar ($^{\circ}\text{C}$)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

5) Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$L5 = \frac{(\%CO \times C) \times \left(\frac{5744}{\text{GCV bahan bakar}} \right)}{\%CO + \%CO_2} \times 100\% \dots\dots\dots (3.9)$$

Dimana:

CO = Volume CO dalam gas buang yang keluar dari *economizer* (%)

CO₂ = Volume aktual CO₂ dalam gas buang (%)

C = Kandungan karbon dalam 1 kg bahan bakar

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

6) Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L6 = \frac{\text{radiation loss} \times A_{\text{total}}}{m_f \times \text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana:

Radiation loss dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Radiation loss} = \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \dots\dots\dots (3.11)$$

Radiation loss (W/m²)

A total = Luas total penampang boiler (m²)

m_f = Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam)

GCB_{BB} = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar (kCal/kg)

V_m = Kecepatan angin (m/s)

T_s = Temperatur sekitar boiler (°C)

T_a = Temperatur udara sekitar (°C)

7) Kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

$$L7 = \frac{\text{Fly ash split} \times m_r \times h_{Fa}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.12)$$

Dimana:

m_r = Massa residu (kg/kg bahan bakar)

h_{fa} = Entalpi *fly ash* (kCal/kg)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor
 bahan bakar (kCal/kg)

8) Kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar

$$L8 = \frac{\text{Bottom ash split} \times m_r \times h_{Ba}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.13)$$

Dimana:

m_r = Massa residu (kg/kg bahan bakar)

h_{Ba} = Entalpi *bottom ash* (kCal/kg)

GCV bahan bakar = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor
 bahan bakar (kCal/kg)

5. Menghitung efisiensi *boiler* metode tidak langsung (η)

$$\eta = 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \dots\dots\dots (3.14)$$

Dimana:

η = Efisiensi *boiler* (%)

Perhitungan efisiensi *boiler* akan dilakukan untuk data komisioning awal tahun 2017, data setelah dilakukan *overhaul* tahun 2022 dan data operasi terkini tahun 2023 untuk mengetahui apakah UPK Punagaya 2x100 MW Unit 1 telah mengalami penurunan efisiensi *boiler*.

6. Menghitung nilai *heat rate*

$$\text{Heat Rate} = \frac{m_f \times \text{GCV}_{BB}}{P_g} \dots\dots\dots (3.15)$$

Dimana:

Heat rate (kCal/kWh)

m_f = Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam)

GCB_{BB} = *Gross Calorific Value* atau nilai kalor bahan bakar
(kCal/kg)

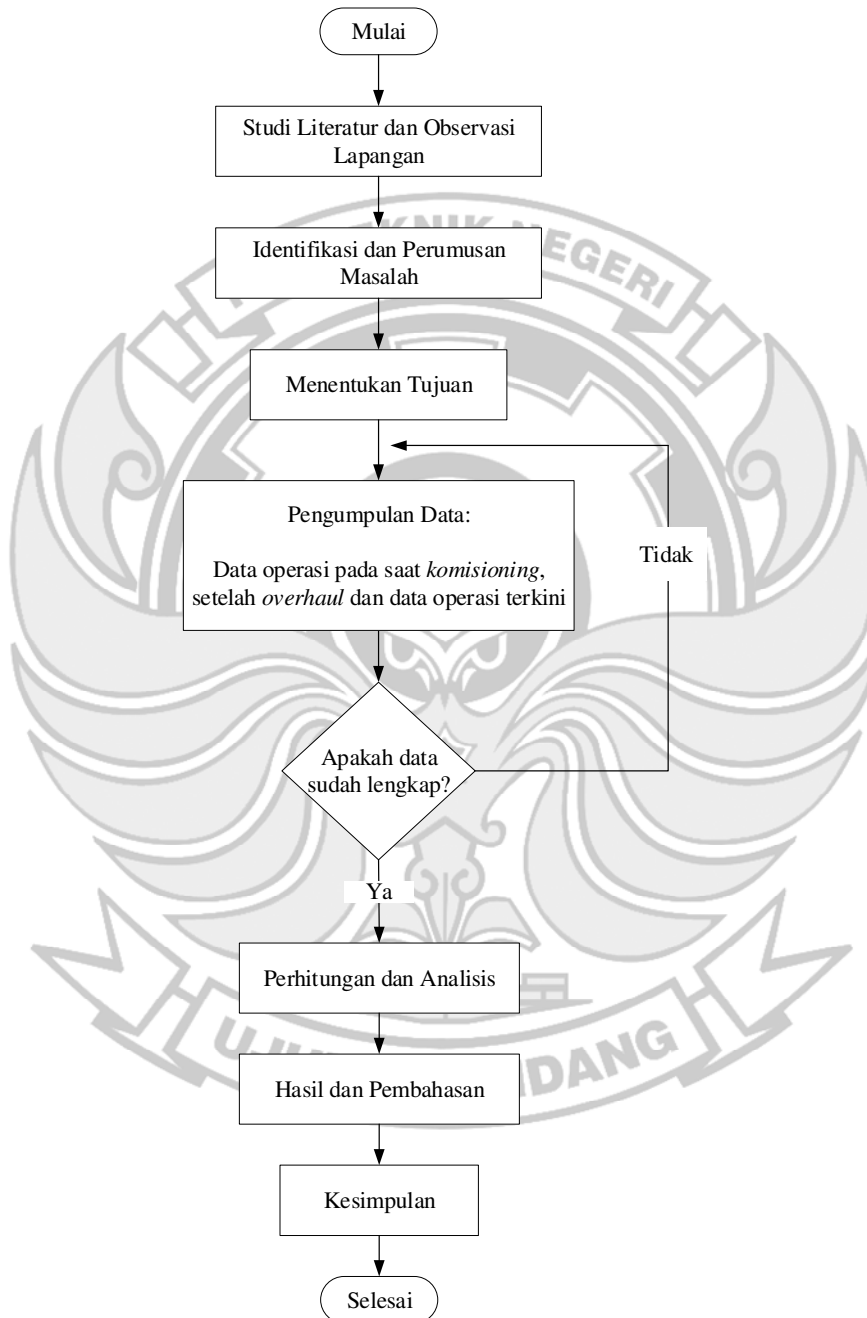
P_g = Daya *output* generator (kW)

Perhitungan *heat rate* akan dilakukan untuk data komisioning awal tahun 2017, data setelah dilakukan *overhaul* tahun 2022 dan data operasi terkini tahun 2023.



3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dapat dilihat pada *flowchart* berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Prosedur Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data Hasil Penelitian

4.1.1 Perhitungan Efisiensi *Boiler* menggunakan Metode Langsung dan *Heat Rate* pada saat Komisioning awal tahun 2018

4.1.1.1 Perhitungan Efisiensi *Boiler*

Berikut ini adalah data atau parameter yang diambil pada saat komisioning awal tanggal 15 Mei 2018 dengan beban sebesar 100 MW. Data ini nantinya dibutuhkan untuk melakukan perhitungan efisiensi *boiler* menggunakan metode langsung.

Tabel 4. 1 Data untuk Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Langsung

Uraian	Nilai
m_s (jumlah <i>steam</i> yang dihasilkan per jam)	370200 kg/jam
h_g (entalpi <i>superheated steam</i>)	3459,86 kJ/kg 826,91 kCal/kg
h_f (entalpi air umpan)	916,86 kJ/kg 219,13 kCal/kg
m_f (konsumsi bahan bakar per jam)	62450 kg/jam
GCV _{BB} (nilai kalor bahan bakar)	4160,89 kCal/kg

Sumber: Data operasi Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW unit 1 tanggal 15 Mei 2018

Berdasarkan Tabel 4.1, perhitungan efisiensi *boiler* menggunakan metode langsung adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{m_s \times (h_g - h_f)}{m_f \times \text{GCV}_{\text{BB}}} \times 100\% \\ &= \frac{370200 \times (826,91 - 219,13)}{62450 \times 4160,89} \times 100\% \\ &= 86,59\%\end{aligned}$$

4.1.1.2 Perhitungan *Heat Rate*

Berdasarkan data pengamatan saat komisioning awal pada bulan Mei 2018 dengan beban sebesar 100 MW yang terdapat pada Lampiran 1, dilakukan perhitungan untuk data pertama yaitu:

Diketahui: $m_f = 45123 \text{ kg/h}$

$GCV_{BB} = 17409,164 \text{ kJ/kg}$

$P_g = 77500,885 \text{ kW}$

$$\begin{aligned} \text{Heat Rate} &= \frac{m_f \times GCV_{BB}}{P_g} \\ &= \frac{45123 \times 17409,164}{77500,885} \\ &= 10135,987 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

Perhitungan *heat rate* dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* dan hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran 5. Dan diperoleh nilai *heat rate* rata-rata pada tanggal 15-17 Mei 2018 sebesar 10358,092 kJ/kWh.

4.1.2 Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* sebelum *Overhaul* Bulan Agustus 2022

4.1.2.1 Perhitungan Efisiensi *Boiler*

Berikut ini adalah data atau parameter yang diambil saat pengetesan *performance boiler* yang dilakukan sebelum *overhaul* bulan Agustus 2022 dengan beban sebesar 110 MW. Data ini nantinya dibutuhkan untuk melakukan perhitungan efisiensi *boiler*.

Tabel 4. 2 Data untuk Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung sebelum *Overhaul* Bulan Agustus 2022

No	Uraian	Simbol	Nilai	Satuan
1	Spesifikasi boiler			
	Temperatur <i>superheated steam</i>		531,66	°C
	Luas total penampang boiler	A_{total}	1035,3	m ²
	Panas spesifik dari <i>superheated steam</i>	C_{ps}	0,514	kCal/kg°C
2	Analisis ultimate dan proximate batu bara			
	<i>Hydrogen</i>	H_2	3,34	%
			0,0334	kg/kg
	<i>Oxygen</i>	O_2	18,15	%
			0,1815	kg/kg
	<i>Sulfur</i>	S	0,11	%
			0,0011	kg/kg
	<i>Carbon</i>	C	41,04	%
			0,4104	kg/kg
	<i>Moisture</i> (massa uap air)	M	32,82	%
		0,3282	kg/kg bahan bakar	
	Nilai kalor bahan bakar	GCV_{BB}	4160,89	kCal/kg
	Konsumsi bahan bakar per jam	m_f	69840	kg/jam
3	Ambient air			
	Kelembaban udara		0,0201	kg/kg udara kering
	Kecepatan angin	V_m	4,06	m/s
	Temperatur udara sekitar	T_a	27,13	°C
	Temperatur sekitar boiler	T_s	33,05	°C
4	Analisis gas buang			
	<i>Oxygen</i> dalam gas buang	O_2	4,26	%
	<i>Carbon Dioxide</i> dalam gas buang	CO_2	14,58	%
	<i>Carbon Monoxide</i> dalam gas buang	CO	0	%
	Temperatur gas buang	T_f	121,63	°C
	Panas spesifik gas buang	C_{pf}	0,257	kCal/kg°C
	Massa gas buang	m	7,31	kg/kg bahan bakar
5	Data fly dan bottom ash			
	<i>Fly ash split</i>		0,67	
	<i>Bottom ash split</i>		0,33	
	Massa residu)	m_r	0,027	kg/kg bahan bakar
	Entalpi <i>ash split</i>)	h_{Fa}	90,09	kJ/kg
			21,53	kCal/kg
	Entalpi <i>bottom split</i>)	h_{Ba}	880,26	kJ/kg
			210,38	kCal/kg

Sumber: Data operasi Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW unit 1 bulan Agustus 2022

Setelah pengambilan data dilakukan, maka dapat dihitung efisiensi boiler dengan menggunakan formula sesuai dengan standar perhitungan metode tidak langsung. Adapun tahap perhitungannya adalah sebagai berikut:

Tahap 1. Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan udara teoritis} &= \frac{[(11.6 \times C) + (34.8 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)) + (4.35 \times S)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= \frac{[(11.6 \times 41,04) + (34.8 \left(3,34 - \frac{18,15}{8} \right)) + (4.35 \times 0,11)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= 5,14 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 2. Menghitung persen kelebihan udara yang disuplai (EA)

$$\begin{aligned} EA &= \frac{\% O_2}{(21 - \% O_2)} \times 100\% \\ &= \frac{4,26}{(21 - 4,26)} \times 100\% \\ &= 25,45\% \end{aligned}$$

Tahap 3. Menghitung massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AAS)

$$\begin{aligned} AAS &= \left\{ 1 + \frac{EA}{100} \right\} \times \text{kebutuhan udara teoritis} \\ &= \left\{ 1 + \frac{25,44}{100} \right\} \times 5,14 \\ &= 6,45 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 4. Menghitung total *losses* (seluruh kehilangan panas)

i. Kehilangan panas karena gas buang kering

$$\begin{aligned} L1 &= \frac{m \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{7,31 \times 0,257 \times (121,63 - 27,13)}{4160,89} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 4,27\%$$

- ii. Kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂ dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L2 &= \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{9 \times 0,0334 \times \{584 + 0,514 (121,63 - 27,13)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 4,57\% \end{aligned}$$

- iii. Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L3 &= \frac{M \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{0,3282 \times \{584 + 0,514 (121,63 - 27,13)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 4,99\% \end{aligned}$$

- iv. Kehilangan panas karena embun di udara

$$\begin{aligned} L4 &= \frac{AAS \times \text{Faktor Kelembaban} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{6,45 \times 0,0201 \times 0,514 \times (121,63 - 27,13)}{4160,89} \times 100\% \\ &= 0,15\% \end{aligned}$$

- v. Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$\begin{aligned} L5 &= \frac{(\%CO \times C) \times \left(\frac{5744}{GCV \text{ bahan bakar}}\right)}{\%CO + \%CO_2} \times 100\% \\ &= \frac{(0 \times 0,4104) \times \left(\frac{5744}{4160,89}\right)}{0 + 14,58} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

- vi. Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L6 = \frac{\text{radiation loss} \times A \text{ total}}{m_f \times GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
 \text{Radiation loss} &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (T_s - \right. \\
 &\quad \left. T_a)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{33,05}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{27,13}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (33,05 - \right. \\
 &\quad \left. 27,13)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 \times 4,06 + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= 64,19 \text{ W/m}^2 \\
 &= 64,67 \times 0,86 \\
 &= 55,20 \text{ kCal/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 L6 &= \frac{55,62 \times 1035,3}{69840 \times 4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,02\%
 \end{aligned}$$

vii. Kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L7 &= \frac{\text{Fly ash split} \times m_r \times h_{Fa}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,67 \times 0,027 \times 21,53}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,01\%
 \end{aligned}$$

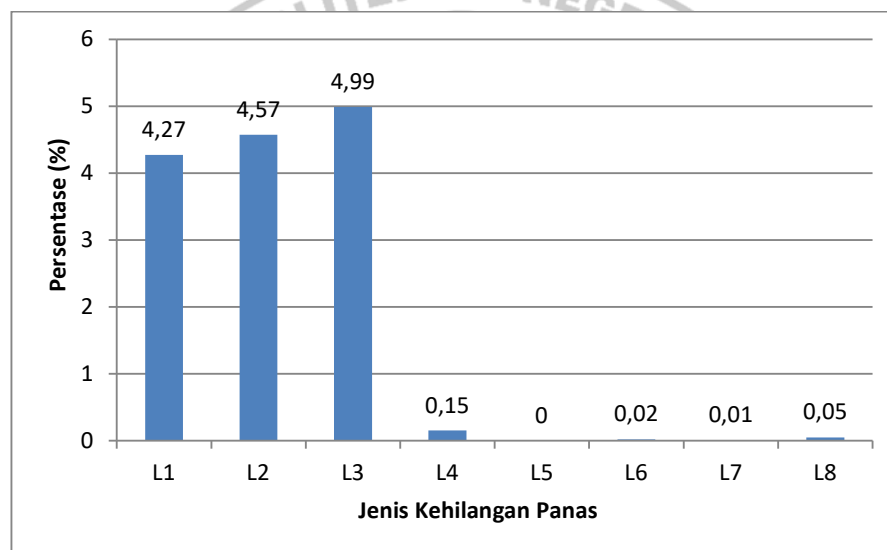
viii. Kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L8 &= \frac{\text{Bottom ash split} \times m_r \times h_{Ba}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,33 \times 0,027 \times 210,38}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,05\%
 \end{aligned}$$

Tahap 5. Menghitung efisiensi *boiler*

$$\begin{aligned}\eta &= 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \\ &= 100\% - (4,27 + 4,57 + 4,99 + 0,15 + 0 + 0,02 + 0,01 + 0,05)\% \\ &= 85,95\%\end{aligned}$$

Di bawah ini adalah grafik persentase dari tiap-tiap kehilangan panas yang terjadi pada *boiler*.



Gambar 4. 1 Grafik Persentase Kehilangan Panas *Boiler* sebelum *Overhaul* pada Bulan Agustus 2022

4.1.2.2 Perhitungan *Heat Rate*

Berdasarkan data pengamatan sebelum *overhaul* pada bulan Agustus 2022 dengan beban sebesar 110 MW yang terdapat pada Lampiran 2, dilakukan perhitungan untuk data pertama yaitu:

Diketahui: $m_f = 64905 \text{ kg/h}$

$GCV_{BB} = 17409,164 \text{ kJ/kg}$

$P_g = 94225,945 \text{ kW}$

$$\begin{aligned} \text{Heat Rate} &= \frac{m_f \times GCV_{BB}}{P_g} \\ &= \frac{64905 \times 17409,164}{94225,945} \\ &= 11991,741 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

Perhitungan *heat rate* dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* dan hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran 6. Dan diperoleh nilai *heat rate* rata-rata pada tanggal 02-04 Agustus 2022 sebesar 11806,819 kJ/kWh.

4.1.3 Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* setelah *Overhaul* Bulan Desember 2022

4.1.3.1 Perhitungan Efisiensi *Boiler*

Berikut ini adalah data atau parameter yang diambil saat pengetesan *performance boiler* yang dilakukan setelah *overhaul* bulan Desember 2022 dengan beban sebesar 105 MW. Data ini nantinya dibutuhkan untuk melakukan perhitungan efisiensi *boiler*.

Tabel 4. 3 Data untuk Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung setelah *Overhaul* Bulan Desember 2022

No	Uraian	Simbol	Nilai	Satuan
1	Spesifikasi boiler			
	Temperatur <i>superheated steam</i>		531,66	°C
	Luas total penampang boiler	A_{total}	1035,3	m ²
	Panas spesifik dari <i>superheated steam</i>	C_{ps}	0,514	kCal/kg°C
2	Analisis ultimate dan proximate batu bara			
	<i>Hydrogen</i>	H ₂	3,34	%
			0,0334	kg/kg
	<i>Oxygen</i>	O ₂	18,18	%
			0,1818	kg/kg
	<i>Sulfur</i>	S	0,11	%
			0,0011	kg/kg
	<i>Carbon</i>	C	41,04	%
			0,4104	kg/kg
	<i>Moisture</i> (massa uap air)	M	32,82	%
		0,3282	kg/kg bahan bakar	
	Nilai kalor bahan bakar	GCV _{BB}	4160,89	kCal/kg
	Konsumsi bahan bakar per jam	m_f	69840	kg/jam
3	Ambient air			
	Kelembaban udara		0,0201	kg/kg udara kering
	Kecepatan angin	V_m	5,08	m/s
	Temperatur udara sekitar	T_a	27,13	°C
	Temperatur sekitar boiler	T_s	33,05	°C
4	Analisis gas buang			
	<i>Oxygen</i> dalam gas buang	O ₂	4,26	%
	<i>Carbon Dioxide</i> dalam gas buang	CO ₂	14,58	%
	<i>Carbon Monoxide</i> dalam gas buang	CO	0	%
	Temperatur gas buang	T_f	121,63	°C
	Panas spesifik gas buang	C_{pf}	0,257	kCal/kg°C
	Massa gas buang	m	7,31	kg/kg bahan bakar
5	Data fly dan bottom ash			
	<i>Fly ash split</i>		0,8	
	<i>Bottom ash split</i>		0,2	
	Massa residu)	m_r	0,027	kg/kg bahan bakar
	Entalpi <i>ash split</i>)	h_{Fa}	90,09	kJ/kg
			21,53	kCal/kg
Entalpi <i>bottom split</i>)	h_{Ba}	880,26	kJ/kg	
		210,38	kCal/kg	

Sumber: Data operasi Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW unit 1 bulan Desember 2022

Setelah pengambilan data dilakukan, maka dapat dihitung efisiensi boiler dengan menggunakan formula sesuai dengan standar perhitungan metode tidak langsung. Adapun tahap perhitungannya adalah sebagai berikut:

Tahap 1. Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan udara teoritis} &= \frac{[(11.6 \times C) + (34.8 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)) + (4.35 \times S)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= \frac{[(11.6 \times 41,04) + (34.8 \left(3,34 - \frac{18,18}{8} \right)) + (4.35 \times 0,11)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= 5,14 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 2. Menghitung persen kelebihan udara yang disuplai (EA)

$$\begin{aligned} EA &= \frac{\% O_2}{(21 - \% O_2)} \times 100\% \\ &= \frac{4,26}{(21 - 4,26)} \times 100\% \\ &= 25,45\% \end{aligned}$$

Tahap 3. Menghitung massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AAS)

$$\begin{aligned} AAS &= \left\{ 1 + \frac{EA}{100} \right\} \times \text{kebutuhan udara teoritis} \\ &= \left\{ 1 + \frac{25,45}{100} \right\} \times 5,14 \\ &= 6,45 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 4. Menghitung total *losses* (seluruh kehilangan panas)

i. Kehilangan panas karena gas buang kering

$$\begin{aligned} L1 &= \frac{m \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{7,31 \times 0,257 \times (121,63 - 27,13)}{4160,89} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 4,27 \%$$

- ii. Kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂ dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L2 &= \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{9 \times 0,0334 \times \{584 + 0,514 (121,63 - 27,13)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 4,57\% \end{aligned}$$

- iii. Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L3 &= \frac{M \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{0,3282 \times \{584 + 0,514 (121,63 - 27,13)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 4,99\% \end{aligned}$$

- iv. Kehilangan panas karena embun di udara

$$\begin{aligned} L4 &= \frac{AAS \times \text{Faktor Kelembaban} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{6,45 \times 0,0201 \times 0,514 \times (121,63 - 27,13)}{4160,89} \times 100\% \\ &= 0,15\% \end{aligned}$$

- v. Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$\begin{aligned} L5 &= \frac{(\%CO \times C) \times \left(\frac{5744}{GCV \text{ bahan bakar}}\right)}{\%CO + \%CO_2} \times 100\% \\ &= \frac{(0 \times 0,4104) \times \left(\frac{5744}{4160,89}\right)}{0 + 14,58} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

- vi. Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L6 = \frac{\text{radiation loss} \times A \text{ total}}{m_f \times GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
 \text{Radiation loss} &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (T_s - \right. \\
 &\quad \left. T_a)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{33,05}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{27,13}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (33,05 - \right. \\
 &\quad \left. 27,13)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 \times 5,08 + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= 71,22 \text{ W/m}^2 \\
 &= 71,22 \times 0,86 \\
 &= 61,25 \text{ kCal/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 L6 &= \frac{61,25 \times 1035,3}{69840 \times 4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,02\%
 \end{aligned}$$

vii. Kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L7 &= \frac{\text{Fly ash split} \times m_r \times h_{Fa}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,8 \times 0,027 \times 21,53}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,01\%
 \end{aligned}$$

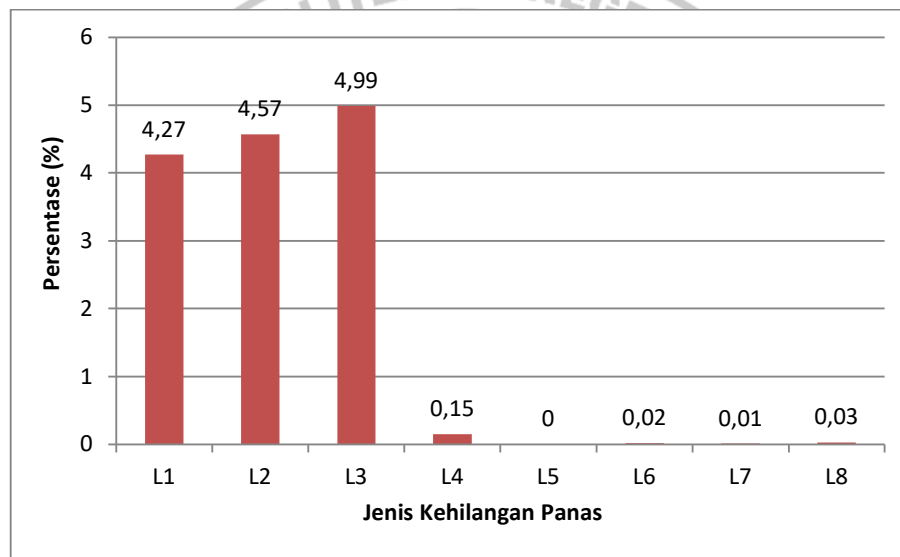
viii. Kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L8 &= \frac{\text{Bottom ash split} \times m_r \times h_{Ba}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,2 \times 0,027 \times 210,38}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,03\%
 \end{aligned}$$

Tahap 5. Menghitung efisiensi *boiler*

$$\begin{aligned}\eta &= 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \\ &= 100\% - (4,27 + 4,57 + 4,99 + 0,15 + 0 + 0,02 + 0,01 + 0,03)\% \\ &= 85,96\%\end{aligned}$$

Di bawah ini adalah grafik persentase dari tiap-tiap kehilangan panas yang terjadi pada *boiler*.



Gambar 4. 2 Grafik Persentase Kehilangan Panas *Boiler* setelah *Overhaul* pada Bulan Desember 2022

4.1.3.2 Perhitungan *Heat Rate*

Berdasarkan data pengamatan setelah *overhaul* pada bulan Desember 2022 dengan beban sebesar 105 MW yang terdapat pada Lampiran 3, dilakukan perhitungan untuk data pertama yaitu:

Diketahui: $m_f = 65921 \text{ kg/h}$
 $GCV_{BB} = 17409,164 \text{ kJ/kg}$
 $P_g = 105590,858 \text{ kW}$

$$\begin{aligned} \text{Heat Rate} &= \frac{m_f \times GCV_{BB}}{P_g} \\ &= \frac{65921 \times 17409,164}{105590,858} \\ &= 10868,719 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

Perhitungan *heat rate* dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* dan hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran 7. Dan diperoleh nilai *heat rate* rata-rata pada tanggal 01-03 Desember 2022 sebesar 11090,034 kJ/kWh.

4.1.4 Perhitungan Efisiensi *Boiler* menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* Bulan Februari 2023

4.1.4.1 Perhitungan Efisiensi *Boiler*

Berikut ini adalah data atau parameter yang diambil saat pengetesan *performance boiler* yang dilakukan pada bulan Februari 2023 dengan beban sebesar 110 MW. Data ini nantinya dibutuhkan untuk melakukan perhitungan efisiensi *boiler*.

Tabel 4. 4 Data untuk Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung pada Bulan Februari 2023

No	Uraian	Simbol	Nilai	Satuan
1	Spesifikasi boiler			
	Temperatur <i>superheated steam</i>		533,04	°C
	Luas total penampang boiler	A_{total}	1035,3	m ²
	Panas spesifik dari <i>superheded steam</i>	C_{ps}	0,514	kCal/kg°C
2	Analisis ultimate dan proximate batu bara			
	Hydrogen	H_2	3,72	%
			0,0372	kg/kg
	Oxygen	O_2	12,83	%
			0,1283	kg/kg
	Sulfur	S	0,24	%
	Carbon	C	41,26	%
			0,4126	kg/kg
	Moisture (massa uap air)	M	32,75	%
			0,3275	kg/kg
Nilai kalor bahan bakar	GCV_{BB}	4160,89	kCal/kg	
Konsumsi bahan bakar per jam	m_f	68981,76	kg/jam	
3	Ambient air			
	Kelembaban udara		0,02	kg/kg udara kering
	Kecepatan angin	V_m	4,94	m/s
	Temperatur udara sekitar	T_a	22,34	°C
	Temperatur sekitar boiler	T_s	27	°C
4	Analisis gas buang			
	Oxygen dalam gas buang	O_2	3,79	%
	Carbon Dioxide dalam gas buang	CO_2	20,25	%
	Carbon Monoxide dalam gas buang	CO	0	%
	Temperatur gas buang	T_f	111,22	°C
	Panas spesifik gas buang	C_{pf}	0,256	kCal/kg°C
Massa gas buang	m	7,05	kg/kg bahan bakar	
5	Data fly dan bottom ash			
	Fly ash split		0,67	
	Bottom ash split		0,33	
	Massa residu)	m_r	0,06	kg/kg bahan bakar
	Entalpi ash split)	h_{Fa}	67,87	kJ/kg
	Entalpi bottom split)	h_{Ba}	16,22	kCal/kg
		862,96	kJ/kg	
		206,25	kCal/kg	

Sumber: Data operasi Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW unit 1 bulan Februari 2023

Setelah pengambilan data dilakukan, maka dapat dihitung efisiensi boiler dengan menggunakan formula sesuai dengan standar perhitungan metode tidak langsung. Adapun tahap perhitungannya adalah sebagai berikut:

Tahap 1. Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan udara teoritis} &= \frac{[(11.6 \times C) + (34.8 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)) + (4.35 \times S)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= \frac{[(11.6 \times 41,26) + (34.8 \left(3,72 - \frac{12,83}{8} \right)) + (4.35 \times 0,24)]}{100 \text{ kg / kg bahan bakar}} \\ &= 5,53 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 2. Menghitung persen kelebihan udara yang disuplai (EA)

$$\begin{aligned} EA &= \frac{\% O_2}{(21 - \% O_2)} \times 100\% \\ &= \frac{3,79}{(21 - 3,79)} \times 100\% \\ &= 22,02\% \end{aligned}$$

Tahap 3. Menghitung massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AAS)

$$\begin{aligned} AAS &= \left\{ 1 + \frac{EA}{100} \right\} \times \text{kebutuhan udara teoritis} \\ &= \left\{ 1 + \frac{25,44}{100} \right\} \times 5,53 \\ &= 6,75 \text{ kg/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Tahap 4. Menghitung total *losses* (seluruh kehilangan panas)

i. Kehilangan panas karena gas buang kering

$$\begin{aligned} L1 &= \frac{m \times C_{pf} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{7,05 \times 0,256 \times (111,22 - 22,34)}{4160,89} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 3,86\%$$

- ii. Kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂ dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L2 &= \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{9 \times 0,0372 \times \{584 + 0,514 (111,22 - 22,34)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 5,07\% \end{aligned}$$

- iii. Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar

$$\begin{aligned} L3 &= \frac{M \times \{584 + C_{ps} (T_f - T_a)\}}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{0,3275 \times \{584 + 0,514 (111,22 - 22,34)\}}{4160,89} \times 100\% \\ &= 4,96\% \end{aligned}$$

- iv. Kehilangan panas karena embun di udara

$$\begin{aligned} L4 &= \frac{AAS \times \text{Faktor Kelembaban} \times C_{ps} \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \\ &= \frac{6,94 \times 0,02 \times 0,514 \times (111,22 - 22,34)}{4160,89} \times 100\% \\ &= 0,15\% \end{aligned}$$

- v. Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$\begin{aligned} L5 &= \frac{(\%CO \times C) \times \left(\frac{5744}{GCV \text{ bahan bakar}}\right)}{\%CO + \%CO_2} \times 100\% \\ &= \frac{(0 \times 0,4126) \times \left(\frac{5744}{4160,89}\right)}{0 + 20,25} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

- vi. Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L6 = \frac{\text{radiation loss} \times A \text{ total}}{m_f \times GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\%$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
 \text{Radiation loss} &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (T_s - \right. \\
 &\quad \left. T_a)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= \left\{ 0.584 \times \left[\left(\frac{27}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{22,34}{55.55} \right)^4 \right] \right\} + \left\{ 1.957 \times (27 - \right. \\
 &\quad \left. 22,34)^{1.25} \times \left[\frac{(196.85 \times 4,94 + 68.9)}{68.9} \right]^{0.5} \right\} \\
 &= 52,11 \text{ W/m}^2 \\
 &= 52,11 \times 0,86 \\
 &= 44,81 \text{ kCal/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 L6 &= \frac{44,81 \times 1035,3}{68981,76 \times 4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,02\%
 \end{aligned}$$

vii. Kehilangan panas karena *fly ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L7 &= \frac{\text{Fly ash split} \times m_r \times h_{Fa}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,67 \times 0,06 \times 16,22}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,02\%
 \end{aligned}$$

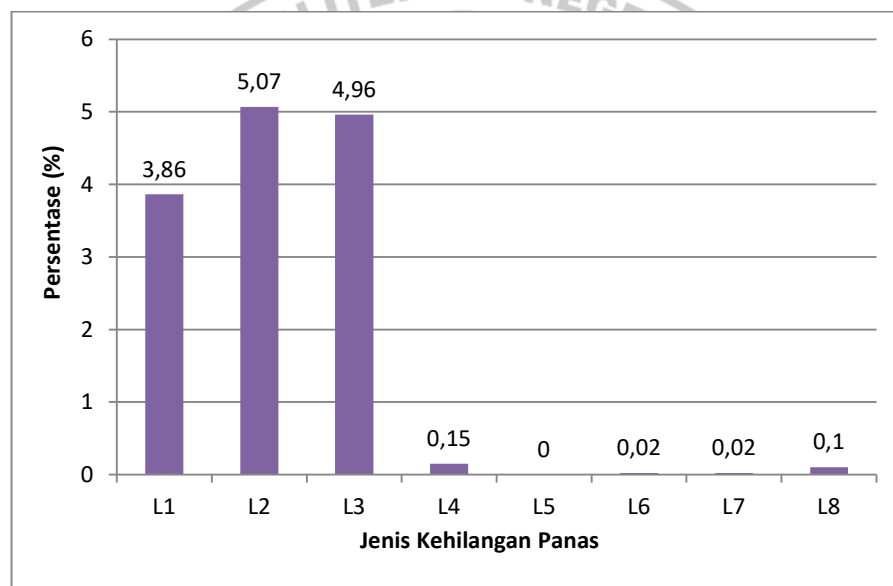
viii. Kehilangan panas karena *bottom ash* yang tidak terbakar

$$\begin{aligned}
 L8 &= \frac{\text{Bottom ash split} \times m_r \times h_{Ba}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,33 \times 0,06 \times 206,25}{4160,89} \times 100\% \\
 &= 0,10\%
 \end{aligned}$$

Tahap 5. Menghitung efisiensi *boiler*

$$\begin{aligned}\eta &= 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \\ &= 100\% - (3,86 + 5,07 + 4,96 + 0,15 + 0 + 0,02 + 0,02 + 0,10)\% \\ &= 85,84\%\end{aligned}$$

Di bawah ini adalah grafik persentase dari tiap-tiap kehilangan panas yang terjadi pada *boiler*.



Gambar 4. 3 Grafik Persentase Kehilangan Panas *Boiler* pada Bulan Februari 2023

4.1.4.2 Perhitungan *Heat Rate*

Berdasarkan data pengamatan setelah *overhaul* pada bulan Februari tahun 2023 dengan beban sebesar 110 MW yang terdapat pada Lampiran 4, dilakukan perhitungan untuk data pertama yaitu:

Diketahui: $m_f = 55546 \text{ kg/h}$

$GCV_{BB} = 17409,164 \text{ kJ/kg}$

$P_g = 80592,911 \text{ kW}$

$$\begin{aligned} \text{Heat Rate} &= \frac{m_f \times GCV_{BB}}{P_g} \\ &= \frac{55546 \times 17409,164}{105590,858} \\ &= 11998,708 \text{ kJ/kWh} \end{aligned}$$

Perhitungan *heat rate* dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* dan hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran 8. Dan diperoleh nilai *heat rate* rata-rata pada tanggal 01-03 Februari 2023 sebesar 13254,820 kJ/kWh.

4.2 Grafik dan Pembahasan

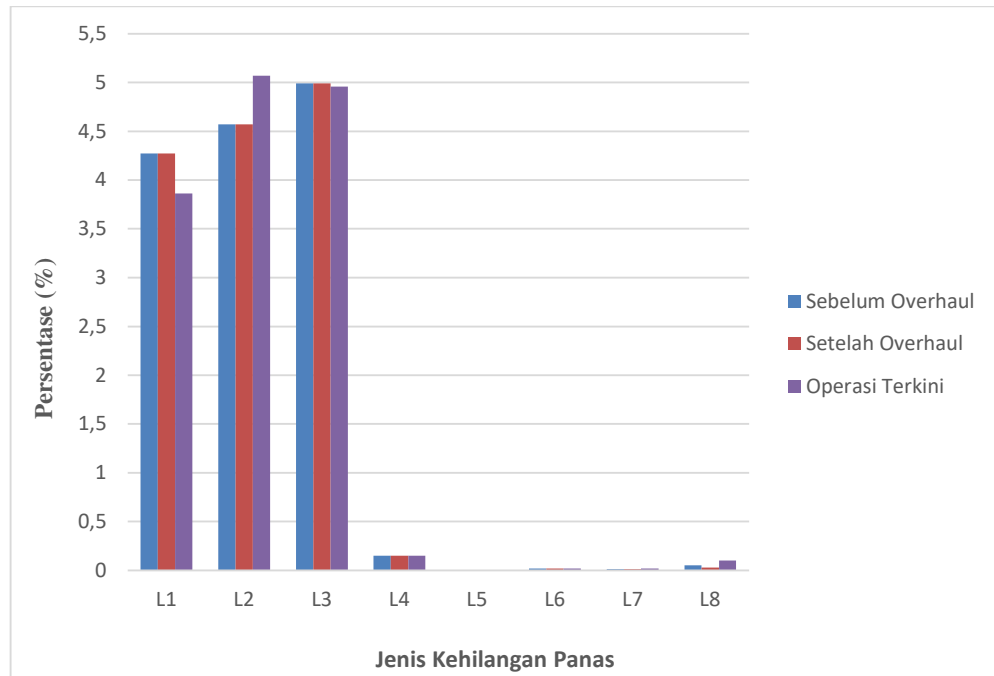
4.2.1 Efisiensi *Boiler*

Dari hasil perhitungan matematis efisiensi *boiler* berdasarkan data komisioning awal tahu 2018, sebelum dan setelah *overhaul* tahun 2022 dan operasi tahun 2023, maka didapatkan hasil nilai kehilangan panas dan efisiensi *boiler* seperti pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Matematis Efisiensi *Boiler* pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah *Overhaul* Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023

Parameter	Satuan	Komisioning Awal	Sebelum <i>Overhaul</i>	Setelah <i>Overhaul</i>	Operasi Terkini
Kehilangan panas dalam gas buang kering (L1)	%	-	4,27	4,27	3,86
Kehilangan panas karena pembentukan air dari H ₂ dalam bahan bakar (L2)	%	-	4,57	4,57	5,07
Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar (L3)	%	-	4,99	4,99	4,96
Kehilangan panas karena embun di udara (L4)	%	-	0,15	0,15	0,15
Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna (L5)	%	-	0	0	0
Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi (L6)	%	-	0,02	0,02	0,02
Kehilangan panas karena <i>fly ash</i> yang tidak terbakar (L7)	%	-	0,01	0,01	0,02
Kehilangan panas karena <i>bottom ash</i> yang tidak terbakar (L8)	%	-	0,05	0,03	0,10
Efisiensi <i>boiler</i>	%	86,59	85,95	85,96	85,84

Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.5 dapat dibuat grafik untuk memudahkan pembahasan hasil analisis data. Gambar 4.5 di bawah ini menggambarkan grafik hasil perhitungan kehilangan panas yang terjadi pada boiler berdasarkan data sebelum dan setelah *overhaul* tahun 2022, dan operasi tahun 2023.



Gambar 4. 4 Grafik Persentase Kehilangan Panas pada Kondisi sebelum dan setelah *Overhaul* Tahun 2022, dan Operasi Tahun 2023

Jenis-jenis kehilangan panas pada *boiler* sangat mempengaruhi nilai efisiensi *boiler*, semakin tinggi nilai kehilangan panas yang dihasilkan *boiler*, maka semakin rendah efisiensi *boiler* yang terjadi. Jika memperhatikan Gambar 4.4 diperoleh hasil akhir dari kehilangan panas yang menunjukkan bahwa terdapat 3 faktor yang berpengaruh besar pada efisiensi *boiler*, dimana persentase kehilangan panasnya lebih dari 1% baik itu pada kondisi sebelum dan setelah *overhaul* tahun 2022, maupun pada operasi tahun 2023 yaitu L1 (kehilangan panas dalam gas buang kering), L2 (kehilangan panas karena pembentukan air dari H₂ dalam bahan bakar)

dan L3 (kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar). Sementara kehilangan panas yang sangat rendah terjadi pada L5 (kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna), hasil kehilangan panas yang sangat rendah ini bahkan bernilai 0% menunjukkan kecilnya kehilangan panas yang tidak akan mempengaruhi efisiensi *boiler*.

Hal ini juga ditunjukkan oleh penelitian terdahulu oleh Karaeng dan Iswandi (2012) menunjukkan bahwa faktor terbesar penurunan efisiensi *boiler* dinyatakan dalam bentuk kehilangan panas dalam gas buang kering, kehilangan panas karena pembentukan air dari kandungan *hydrogen* dalam bahan bakar, dan kehilangan panas karena adanya kandungan air (embun) dalam bahan bakar.

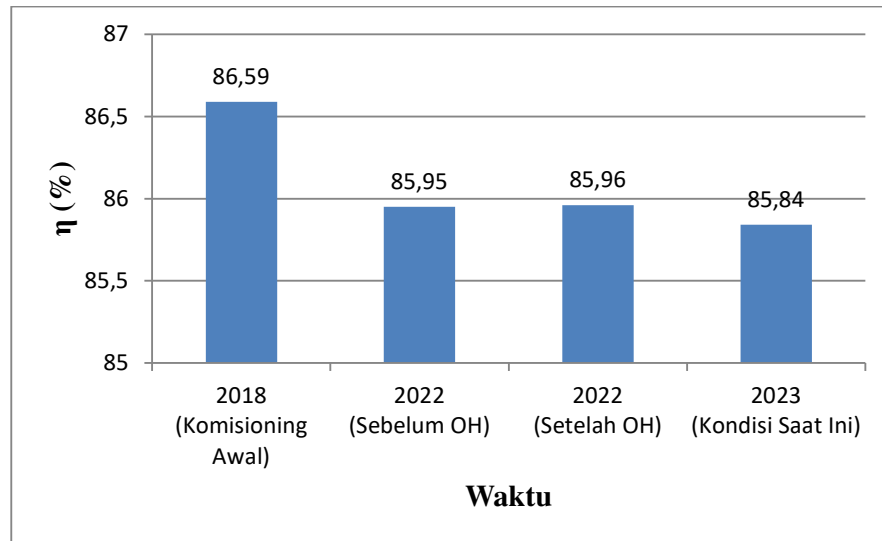
Faktor pertama yang sangat mempengaruhi efisiensi boiler yaitu kehilangan panas dalam gas buang kering (L1). Kehilangan panas dalam gas buang kering sebelum dan setelah *overhaul* memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 4,27% dan pada operasi tahun 2023 bernilai 3,86%, hal ini terjadi karena temperatur gas buang kering yang terjadi sebelum dan setelah *overhaul* bernilai 121,63°C, sedangkan karena temperatur gas buang kering yang terjadi pada operasi tahun 2023 bernilai 111,22°C. Temperatur gas buang yang cukup tinggi menyebabkan semakin tinggi pula panas yang keluar dari *boiler*, dengan kata lain akan mengurangi efisiensi *boiler*. Oleh karena itu, temperatur gas buang harus serendah mungkin, tetapi tidak boleh terlalu rendah karena dapat mengakibatkan uap air akan mengembun pada dinding cerobong. Karaeng dan Iswandi (2012) menjelaskan bahwa setiap kenaikan temperatur gas buang 1°C akan mengakibatkan efisiensi *boiler* turun sebesar 0,05%. Terjadinya peningkatan panas pada gas buang kering juga disebabkan oleh

kurang berfungsinya permukaan pipa-pipa (*tube*) di dalam *boiler* dalam menyerap panas yang disebabkan karena pipa-pipa boiler mengalami *slaging*.

Faktor kedua yaitu kehilangan panas karena pembentukan air dari H_2 dalam bahan bakar (L2), yang merupakan kehilangan panas akibat kelembaban dari pembakaran *hydrogen* (H_2), kandungan *hydrogen* tersebut berasal dari batu bara yang digunakan. Kehilangan panas ini tidak dapat dihindari, akan tetapi dapat diminimalisir dengan cara menggunakan batu bara yang sesuai dengan spesifikasi standar. Kehilangan panas karena pembentukan air dari H_2 sebelum dan setelah *overhaul* memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 4,57% dan pada operasi tahun 2023 bernilai 5,07%. Terjadi kenaikan nilai kehilangan panas sebesar 0,05% yang disebabkan karena analisa kandungan *hydrogen* pada batu bara yang digunakan pada data operasi 2023 lebih besar yaitu 4,72% sedangkan sebelum dan setelah *overhaul* hanya 3,34%, sehingga mempengaruhi nilai kehilangan panasnya.

Faktor ketiga yaitu kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar disebabkan karena kandungan *hydrogen* (H_2) dalam batu bara (L3), yang apabila digunakan akan bereaksi dengan oksigen dari udara dan membentuk uap air (H_2O). Unsur *moisture* (massa uap air) dan unsur kandungan *hydrogen* pada batu bara merupakan faktor penting terhadap kinerja boiler, semakin tinggi unsur *moisture* pada batu bara maka kalor yang timbul akibat pembakaran bahan bakar di *boiler* sebagian akan diserap oleh kandungan air pada batu bara, sehingga mengurangi kalor yang digunakan oleh *boiler* untuk menguapkan air umpan (*feed water*). Nilai kalor bahan bakar juga sangat berpengaruh terhadap proses pembakaran yang terjadi, dimana semakin tinggi nilai kalor yang terkandung pada bahan bakar, maka

pembakaran akan menghasilkan energi panas yang lebih tinggi dan akan meningkatkan efisiensi *boiler*. Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar sebelum dan setelah *overhaul* memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 4,99% dan pada operasi tahun 2023 bernilai 4,96%, hal ini terjadi karena *moisture* (massa uap air dalam batu bara) yang terjadi sebelum dan setelah *overhaul* bernilai 0,3282 kg/kg bahan bakar, sedangkan *moisture* (massa uap air dalam batu bara) yang terjadi pada operasi tahun 2023 bernilai 0,3275 kg/kg bahan bakar. Penurunan nilai kehilangan panasnya tidak terlalu signifikan, akan tetapi untuk meminimalisir terjadinya peningkatan kehilangan panas, dapat dilakukan dengan mengoptimalkan fungsi dari *primary air fan* (PAF) karena selain berfungsi sebagai udara transportasi batu bara ke *furnace*, *primary air fan* juga berfungsi sebagai pengering batu bara tersebut dengan tujuan untuk mengurangi kandungan air di dalam batu bara itu sendiri. Untuk itu harus dilakukan pemeliharaan rutin pada alat bantu *boiler* ini agar dapat beroperasi sesuai fungsinya dan membantu meningkatkan efisiensi *boiler*.



Gambar 4. 5 Grafik Efisiensi *Boiler* pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah *Overhaul* Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023

Berdasarkan Gambar 4.5 diperoleh hasil akhir yaitu terjadi penurunan efisiensi *boiler* sebelum *overhaul*. Efisiensi *boiler* pada saat komisioning awal tahun 2018 bernilai 86,59%, sedangkan di tahun 2022 sebelum dilakukan *overhaul* nilai efisiensi *boiler* bernilai 85,95%, hal ini disebabkan karena kondisi *boiler* yang mulai mengalami penurunan kinerja yang berbeda saat awal operasi, dimana kondisi *boiler* masih baru dan kinerjanya yang handal.

Setelah terjadi *overhaul* tahun 2022, efisiensi *boiler* mengalami peningkatan akibat *overhaul*, walaupun nilai peningkatannya tidak terlalu signifikan yaitu dari 85,95% ke 85,96%. Hal ini disebabkan karena pada *boiler* telah dilakukan beberapa perbaikan komponen seperti *furnance*, *steam drum*, *cyclone*, *superheater system* dan *economizer system* seperti yang terlampir pada Lampiran 9.

Kemudian pada operasi di tahun 2023 efisiensi *boiler* kembali mengalami penurunan dengan nilai 85,84%. Seiring berjalannya waktu, *boiler* akan mengalami penurunan kinerja yang disebabkan oleh umur pakai peralatan (*life time*) dari *boiler*.

Semakin lama umur pakai peralatan maka kinerja *boiler* akan semakin menurun.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penjadwalan pemeliharaan *boiler* secara teratur.

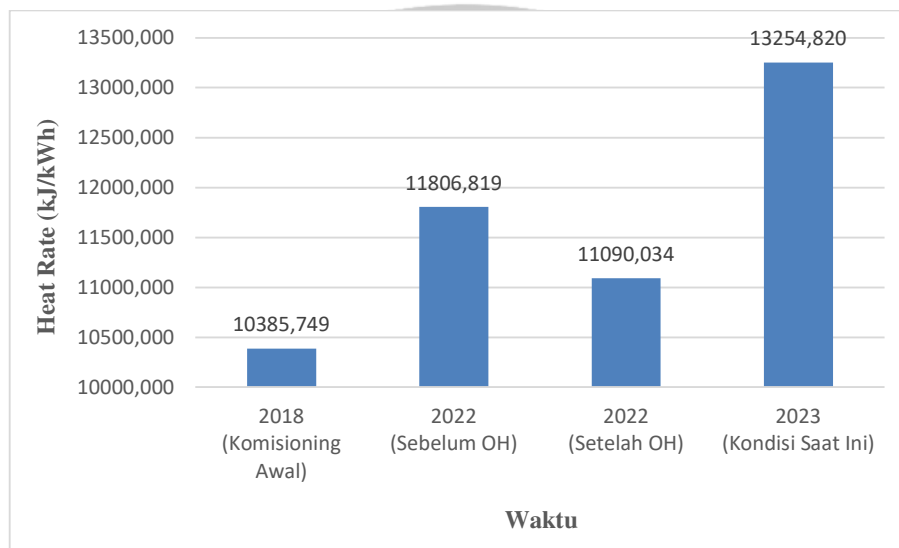
4.2.2 Heat Rate

Dari hasil perhitungan matematis nilai *heat rate* berdasarkan data komisioning awal tahun 2018, sebelum dan setelah *overhaul* tahun 2022 dan operasi tahun 2023, maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Matematis Nilai *Heat Rate* pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah *Overhaul* Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023

No.	Pengambilan Data	Tanggal	m_f (kg/h)	P_g (kW)	<i>Heat Rate</i> (kJ/kWh)	<i>Heat Rate</i> Rata-rata (kJ/kWh)
1	Komisioning awal	15/05/2018	56106	97787,903	10005,692	10358,092
		16/05/2018	34235	57111,704	10455,390	
		17/05/2018	33791	55429,757	10613,195	
2	Sebelum <i>Overhaul</i>	02/08/2022	59385	86486,961	11955,236	11806,819
		03/08/2022	66673	94390,228	11893,946	
		04/08/2022	68794	103525,417	11571,273	
3	Setelah <i>Overhaul</i>	01/12/2022	66949	105997,393	10996,116	11090,034
		02/12/2022	68052	107046,107	11067,605	
		03/02/2022	68663	106671,587	11206,381	
4	Operasi Terkini	01/02/2023	70364	99908,511	12268,268	13254,820
		02/02/2023	75190	97174,448	13399,928	
		03/02/2023	89975	111143,060	14096,265	

Dari hasil perhitungan nilai *heat rate* pada Tabel 4.6 dapat dibuat grafik untuk memudahkan pembahasan hasil analisis data. Gambar 4.6 di bawah ini menggambarkan grafik hasil perhitungan nilai *heat rate* berdasarkan data komisioning awal tahun 2018, sebelum dan setelah *overhaul* tahun 2022 dan operasi tahun 2023.



Gambar 4. 6 Grafik Nilai *Heat Rate* pada Kondisi Komisioning Awal Tahun 2018, sebelum dan setelah *Overhaul* Tahun 2022 dan Operasi Tahun 2023

Kinerja suatu unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap juga dapat dievaluasi dengan besarnya nilai *heat rate*. Semakin rendah nilai *heat rate*, maka semakin handal kinerja suatu unit dalam beroperasi karena energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik semakin kecil. Kebutuhan energi yang semakin kecil akan menurunkan pemakaian batu bara sehingga biaya produksi listrik suatu unit pembangkit semakin rendah.

Berdasarkan Gambar 4.6 diperoleh hasil akhir nilai *heat rate* yaitu pada komisioning awal tahun 2018 bernilai 10385,749 kJ/kWh dengan nilai kalor bahan bakar sebesar 17409,164 kJ/kg, kemudian mengalami peningkatan sebelum

overhaul tahun 2022 yang bernilai 11806,819 kJ/kWh. Hal ini disebabkan karena terjadi peningkatan konsumsi bahan bakar (m_f) yang digunakan dengan nilai rata-rata pada komisioning awal sebesar 41377 kg/h menjadi 64217 kg/h pada saat sebelum *overhaul*. Sementara daya *output* generator (P_g) yang dihasilkan juga mengalami peningkatan dengan nilai rata-rata pada komisioning awal sebesar 70109,788 kW menjadi 94800,869 kW pada saat sebelum *overhaul*.

Kemudian terjadi penurunan nilai *heat rate* setelah *overhaul* yang bernilai 11090,034 kJ/kWh, hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kinerja unit pembangkitan setelah dilakukan *overhaul*. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh penelitian terdahulu oleh Afgan (2022), yang menunjukkan adanya penurunan nilai *heat rate* setelah *overhaul* dari 15800,407 kJ/kWh ke 15297,629 kJ/kWh.

Dan pada operasi terkini tahun 2023 terjadi peningkatan *heat rate* yang bernilai 13254,820 kJ/kWh, hal ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan kinerja unit pembangkitan di tahun 2023. Peningkatan nilai *heat rate* yang terjadi pada bulan Februari 2023 disebabkan oleh terjadinya peningkatan konsumsi bahan bakar (m_f) yang digunakan dengan nilai rata-rata pada saat setelah *overhaul* di bulan Desember 2022 sebesar 67888 kg/h menjadi 78510 kg/h pada operasi terkini bulan Februari 2023. Sementara daya *output* generator yang dihasilkan semakin kecil, dimana nilai rata-rata pada saat setelah *overhaul* di bulan Desember 2022 sebesar 106571,695 kW menjadi 102742,006 kW pada operasi terkini bulan Februari 2023

Heat rate tidak selamanya harus sesuai dengan nilai kalor bahan bakar yang digunakan, artinya pemakaian batu bara yang memiliki nilai kandungan kalori tinggi belum tentu menghasilkan *heat rate* yang rendah akan tetapi harus juga

memperhatikan konsumsi batu bara yang digunakan dan juga daya *output* dari generator. Semakin kecil konsumsi bahan bakar yang digunakan dengan nilai daya *output* generator yang besar, maka akan menghasilkan nilai heat rate yang kecil. Namun sebaliknya, semakin besar konsumsi bahan bakar yang digunakan dengan nilai daya *output* generator yang kecil, maka akan menghasilkan nilai heat rate yang besar.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai efisiensi *boiler* PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya Unit 1 sebelum dilakukan *overhaul* 2022 mengalami penurunan sebesar 0,64% dan setelah dilakukan *overhaul* mengalami peningkatan sebesar 0,01% walaupun cenderung jauh dari nilai komisioning tahun 2018, namun pada kondisi saat ini di tahun 2023 mengalami penurunan sebesar 0,12%.
2. Nilai *heat rate* PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya Unit 1 sebelum dilakukan *overhaul* 2022 mengalami peningkatan sebesar 1421,07 kJ/kWh dan setelah dilakukan *overhaul* mengalami penurunan sebesar 716,785 kJ/kWh walaupun masih jauh dari nilai komisioning tahun 2018, namun pada kondisi saat ini di tahun 2023 mengalami peningkatan sebesar 2164,786 kJ/kWh.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis berikan adalah:

1. Upaya untuk meningkatkan efisiensi *boiler* dapat dilakukan dengan mengoptimalkan *maintenance* pada pembersihan pipa-pipa (*tube*) untuk meningkatkan proses penyerapan panas pada pipa-pipa *boiler*.
2. Memilih batu bara dengan kualitas nilai *hydrogen* (H_2) dan *moisture* (massa uap air) yang rendah untuk meningkatkan proses penggunaan kalor pembakaran dalam menguapkan air umpan.
3. Menggunakan bahan bakar dengan nilai kalori yang tinggi dan konsumsi panas bahan bakar yang terkecil sehingga mendapatkan nilai *heat rate* terbaik (terendah)
4. Penelitian selanjutnya terkait efisiensi *boiler* dan *heat rate* diharapkan lebih teliti dan memahami data yang diperlukan untuk mencari nilai persentase kehilangan panas maupun efisiensi *boiler* dan nilai *heat rate*.

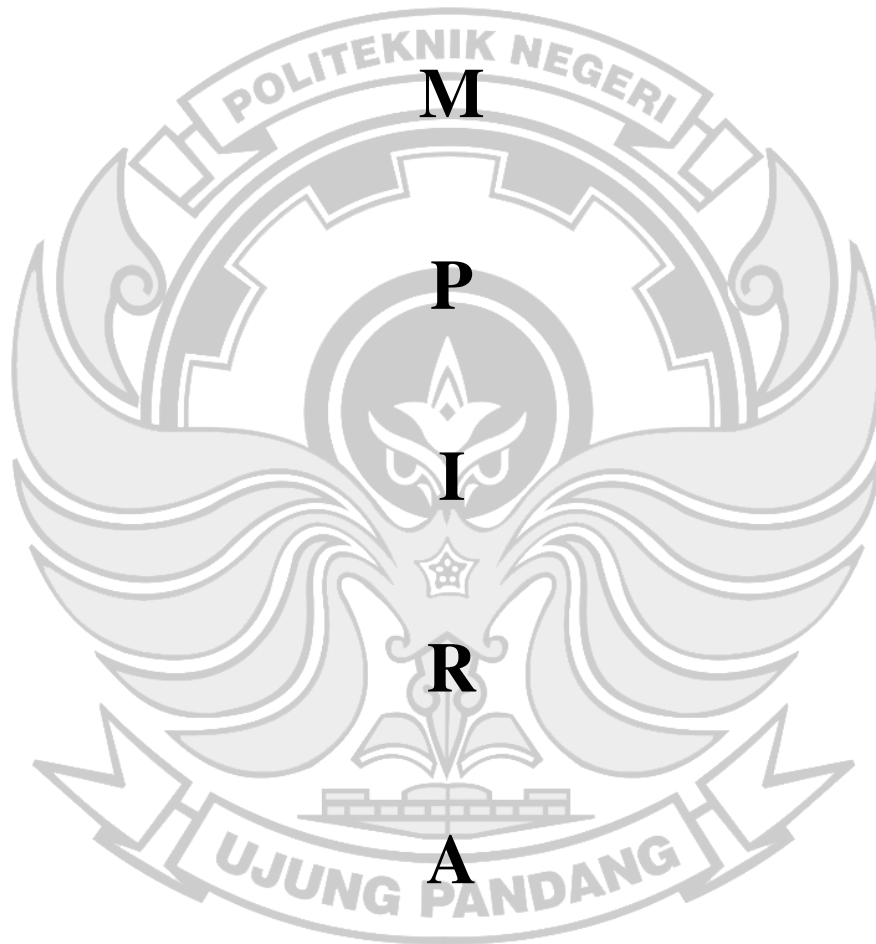
DAFTAR PUSTAKA

- A.A Nuraini, Abdul Aziz Hairuddin, Salmi Samsudin. 2018. Efficiency and Boiler Parameters Effects in Sub-critical Boiler with Different Types of Sub-bituminous Coal. *Journal of Science and Technology*. V (8).
- Aeroengineering.co.id. 2022. *Siklus Rankine pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap*. (Online), (<https://www.aeroengineering.co.id/2022/05/siklus-rankine-pada-pembangkit-listrik-tenaga-uap/>), diakses 24 Juli 2023.
- Afgan, Muhammad Alif Al. 2022. *Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah di Kota Makassar*. Skripsi. Makassar: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) PTC 4-1. 2013. *Performance Test Code Fired Steam Generators*.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) PTC 6. 2004. *Performance Test Code on Steam Turbine*.
- Aziz, Amir dan Andi Rinaldi Hasan. 2015. Evaluasi Heat Rate dan Efisiensi Suatu PLTU dengan Menggunakan Batubara yang Berbeda dari Spesifikasi Design. *Jurnal Energi dan Lingkungan Vol. 11*, VIII (1): 2-3.
- Dwi Wahyu S, Hardiansyah, Muhammad Ivanto. 2019. *Analisis Perhitungan Efisiensi Boiler Kapasitas 55 Ton/Jam di PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) PLTU Katapang 2x100 MW*. Skripsi. Pontianak: Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Gunawan, Wawan dan Bambang Ali G. 2020. Studi Efisiensi Boiler terhadap Nilai Kalor Batubara pada Boiler Jenis Pulverizer Coal Kapasitas 300 T/H (Studi Kasus PT XYZ). *Jurnal In Tent Vol. 3*, II (2): 123.
- Hendri, Suhengki, Panji Ramadhan. 2017. Analisis Efisiensi *Boiler* dengan Metode *Heat Loss* Sebelum dan Sesudah *Overhaul* PT. Indonesia Power UBP PLTU Lontar Unit 3. *Jurnal Power Plant Vol. 4*, VI (4): 220-221.
- Isfandi. *Analisis Heat Rate pada Sistem Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Unit 3 PLTU Jeranjang*. Skripsi. Mataram: Jurusan Teknik Mesin Universitas Mataram.
- Jamaluddin dan Reza Pangestu DH. 2018. Analisis Perhitungan Heat Rate pada Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Unit 1 di PT Indonesia Power Uboh UPJ Banten 3 Lontar. *Jurnal Teknik Mesin Muhammadiyah Tangerang Vol. 2*, V (1): 46.

- Karaeng, Christian Tallu dan Iswandi. 2012. *Analisis Kinerja Boiler pada PLTU Unit 1 PT Semen Tonasa*. Skripsi. Makassar: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Kharisma, Aji Abdillah dan Arif Budiman. 2020. Perhitungan Efisiensi (Efficiency) Mesin Boiler Jenis Fire-Tube Menggunakan Metode Direct dan Indirect Untuk Produksi Butiran-Butiran Pelet. *Jurnal Universitas Gunadarma Vol.14, III (12): 1*.
- Nagar Virendra, Dr. V. K. Soni, Dr. V. K. Khare. 2013. Boiler Efficiency Improvement through Analysis of Losses. *Journal International for Scientific Research & Development Vol. 1, X (3): 801*.
- Nurhasanah, Roswati. 2015. Perbandingan Efisiensi Boiler Awal Operasi dan Setelah Overhaul Terakhir di Unit 5 PLTU Suralaya. *Jurnal Power Plant, VIII: 45*.
- Pengoperasian PLTU S1 UPK Punagaya 2x100 MW*. 2017. PLN Corporate University.
- Pravitasari Yolanda, Mariana B Malino, Muhlasah Novitasari Mara. 2017. Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung. *Jurnal Prima Fisika Vol. 5, VI (1): 10-11*.
- Purba, Yosua Martua. 2020. *Analisis Perbandingan Efisiensi Boiler dengan Metode Heat-Losses pada saat Awal Operasi dan setelah Overhaul di PT Pomi Paiton*. Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jember.
- Rakhman, Alief. 2013. *Fungsi dan Prinsip Kerja PLTU*. (Online), 10, (<https://rakhman.net/power-plants-id/fungsi-dan-prinsip-kerja-pltu/>), diakses 13 Januari 2023.
- Rijal, Samsul dan Masykur. 2022. Analisis Kehilangan Panas pada Boiler Type SFW 7000 di PT Socfindo Kebun Seunagan. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin Vol. 7, I: 132*.
- Sahid dan Budhi Prasetyo. 2016. Heat Rate Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton Baru (Unit 9) Berdasarkan Performance Test Tiap Bulan dengan Beban 100%. *Jurnal Teknik Energi Vo. 12, VII (2): 32*.
- Sobri Muhammad. 2017. *Pengantar Teknologi Informasi-Konsep dan Teori* (Online), (<https://www.kompas.com/skola/140000969/microsoft-excel-definisi-fungsi-kelebihan-dan-kekurangannya>), diakses 22 Juni 2023.
- Zaman, Muhammad Rizaldi dan Nazaruddin Sinaga. 2021. Evaluasi Kerugian Termal pada Pembangkit Tenaga Batubara 600 MW Menggunakan Metode Efisiensi Tidak Langsung. *Journal of Science and Technology Vol. 19, II (1)*.

L

A



M

P

I

R

A

N

Lampiran 1 Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai *Heat Rate* saat Komisioning Awal pada Bulan Mei 2018 dengan Beban Sebesar 100 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	mf (kg/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)	Pg (kW)
15/05/2018	00:00:00	45,123	45123	4160,890	77,501	77500,885
	01:00:00	47,296	47296	4160,890	79,006	79006,142
	02:00:00	51,379	51379	4160,890	88,948	88947,990
	03:00:00	51,542	51542	4160,890	88,520	88519,646
	04:00:00	50,727	50727	4160,890	88,254	88253,761
	05:00:00	50,912	50912	4160,890	88,243	88242,775
	06:00:00	50,705	50705	4160,890	88,901	88900,993
	07:00:00	51,093	51093	4160,890	88,169	88168,655
	08:00:00	51,248	51248	4160,890	88,804	88804,184
	09:00:00	51,750	51750	4160,890	88,547	88546,890
	10:00:00	51,749	51749	4160,890	89,078	89077,805
	11:00:00	52,024	52024	4160,890	89,068	89068,314
	12:00:00	51,586	51586	4160,890	88,015	88014,694
	13:00:00	61,670	61670	4160,890	104,797	104796,997
	14:00:00	63,861	63861	4160,890	111,227	111227,432
	15:00:00	62,799	62799	4160,890	111,588	111588,036
	16:00:00	62,633	62633	4160,890	111,328	111327,538
	17:00:00	62,889	62889	4160,890	110,748	110747,604
	18:00:00	62,688	62688	4160,890	109,986	109985,756
	19:00:00	62,488	62488	4160,890	112,519	112519,119
	20:00:00	62,683	62683	4160,890	111,528	111528,046
	21:00:00	62,475	62475	4160,890	110,738	110738,235
	22:00:00	62,626	62626	4160,890	110,705	110704,903
23:00:00	62,609	62609	4160,890	110,693	110693,275	
16/05/2018	00:00:00	48,220	48220	4160,890	85,649	85648,743
	01:00:00	37,543	37543	4160,890	66,576	66576,309
	02:00:00	31,510	31510	4160,890	52,921	52921,108
	03:00:00	33,089	33089	4160,890	55,446	55446,400
	04:00:00	33,017	33017	4160,890	55,291	55290,867
	05:00:00	33,062	33062	4160,890	55,350	55349,731
	06:00:00	33,047	33047	4160,890	55,165	55164,883
	07:00:00	33,529	33529	4160,890	54,864	54863,724
	08:00:00	33,456	33456	4160,890	55,374	55373,928
	09:00:00	34,585	34585	4160,890	55,620	55620,037
	10:00:00	34,477	34477	4160,890	56,389	56389,290

	11:00:00	34,025	34025	4160,890	54,501	54501,099
	12:00:00	33,894	33894	4160,890	56,479	56478,729
	13:00:00	32,974	32974	4160,890	55,037	55037,441
	14:00:00	32,993	32993	4160,890	55,352	55351,715
	15:00:00	33,605	33605	4160,890	56,021	56021,477
	16:00:00	33,706	33706	4160,890	56,145	56144,642
	17:00:00	33,532	33532	4160,890	56,123	56123,383
	18:00:00	33,531	33531	4160,890	55,871	55870,922
	19:00:00	33,715	33715	4160,890	55,285	55284,992
	20:00:00	33,601	33601	4160,890	55,434	55434,155
	21:00:00	33,526	33526	4160,890	55,395	55395,237
	22:00:00	33,359	33359	4160,890	55,098	55097,710
	23:00:00	33,639	33639	4160,890	55,294	55294,376
17/05/2018	00:00:00	33,664	33664	4160,890	55,656	55655,689
	01:00:00	33,504	33504	4160,890	55,252	55252,331
	02:00:00	33,376	33376	4160,890	55,222	55221,645
	03:00:00	33,543	33543	4160,890	55,401	55400,543
	04:00:00	33,624	33624	4160,890	55,048	55047,508
	05:00:00	33,320	33320	4160,890	54,721	54721,062
	06:00:00	33,598	33598	4160,890	55,202	55202,393
	07:00:00	33,735	33735	4160,890	55,928	55927,902
	08:00:00	33,381	33381	4160,890	55,397	55397,480
	09:00:00	33,522	33522	4160,890	54,686	54685,753
	10:00:00	33,452	33452	4160,890	54,788	54788,338
	11:00:00	34,018	34018	4160,890	55,484	55484,356
	12:00:00	34,041	34041	4160,890	55,903	55903,080
	13:00:00	33,946	33946	4160,890	56,134	56134,087
	14:00:00	34,026	34026	4160,890	55,854	55853,905
	15:00:00	34,108	34108	4160,890	55,584	55583,954
	16:00:00	34,004	34004	4160,890	55,213	55212,551
	17:00:00	33,896	33896	4160,890	55,195	55195,427
	18:00:00	34,018	34018	4160,890	55,204	55204,498
	19:00:00	34,203	34203	4160,890	54,932	54931,870
	20:00:00	34,000	34000	4160,890	55,462	55462,330
	21:00:00	34,166	34166	4160,890	55,679	55678,997
	22:00:00	33,852	33852	4160,890	56,336	56335,670
23:00:00	33,980	33980	4160,890	56,033	56032,791	

Lampiran 2 Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai *Heat Rate* sebelum *Overhaul* pada Bulan Agustus 2022 dengan Beban Sebesar 110 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	mf (kg/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)	Pg (kW)
02/08/2022	00:00:00	64,905	64905	4160,890	94,226	94225,945
	01:00:00	65,482	65482	4160,890	95,385	95384,834
	02:00:00	65,369	65369	4160,890	97,000	96999,657
	03:00:00	57,962	57962	4160,890	84,061	84060,753
	04:00:00	57,534	57534	4160,890	85,654	85654,335
	05:00:00	57,505	57505	4160,890	85,188	85187,538
	06:00:00	58,155	58155	4160,890	85,242	85242,264
	07:00:00	58,534	58534	4160,890	84,666	84666,267
	08:00:00	58,631	58631	4160,890	85,637	85637,245
	09:00:00	60,114	60114	4160,890	85,149	85148,628
	10:00:00	59,192	59192	4160,890	86,173	86173,233
	11:00:00	58,186	58186	4160,890	84,482	84481,796
	12:00:00	58,790	58790	4160,890	86,057	86057,297
	13:00:00	58,865	58865	4160,890	86,013	86012,589
	14:00:00	59,211	59211	4160,890	85,978	85977,776
	15:00:00	58,813	58813	4160,890	84,984	84984,138
	16:00:00	58,850	58850	4160,890	84,614	84613,853
	17:00:00	59,213	59213	4160,890	84,364	84363,640
	18:00:00	58,938	58938	4160,890	86,029	86029,037
	19:00:00	58,796	58796	4160,890	86,130	86130,211
	20:00:00	57,581	57581	4160,890	84,923	84922,508
	21:00:00	58,205	58205	4160,890	85,149	85148,979
	22:00:00	57,913	57913	4160,890	84,499	84498,634
23:00:00	58,489	58489	4160,890	84,086	84085,899	
03/08/2022	00:00:00	58,226	58226	4160,890	85,111	85110,596
	01:00:00	58,484	58484	4160,890	83,917	83916,534
	02:00:00	58,786	58786	4160,890	84,607	84607,079
	03:00:00	66,581	66581	4160,890	96,058	96057,709
	04:00:00	67,266	67266	4160,890	97,211	97211,113
	05:00:00	64,962	64962	4160,890	97,487	97487,450
	06:00:00	64,398	64398	4160,890	96,044	96044,022
	07:00:00	64,945	64945	4160,890	95,574	95573,997
	08:00:00	64,795	64795	4160,890	95,309	95309,105
	09:00:00	65,992	65992	4160,890	95,744	95744,019
	10:00:00	65,628	65628	4160,890	95,716	95716,095

	11:00:00	65,929	65929	4160,890	95,285	95284,752
	12:00:00	65,447	65447	4160,890	95,631	95630,981
	13:00:00	65,626	65626	4160,890	96,493	96493,317
	14:00:00	65,026	65026	4160,890	95,350	95349,564
	15:00:00	64,743	64743	4160,890	95,549	95549,278
	16:00:00	65,028	65028	4160,890	95,348	95347,580
	17:00:00	64,864	64864	4160,890	95,484	95483,795
	18:00:00	65,009	65009	4160,890	94,968	94968,163
	19:00:00	65,328	65328	4160,890	95,090	95089,706
	20:00:00	65,391	65391	4160,890	95,347	95347,031
	21:00:00	65,432	65432	4160,890	95,319	95318,657
	22:00:00	64,761	64761	4160,890	96,554	96554,497
	23:00:00	64,710	64710	4160,890	96,170	96170,433
04/08/2022	00:00:00	64,186	64186	4160,890	96,167	96167,015
	01:00:00	64,202	64202	4160,890	96,764	96763,596
	02:00:00	64,859	64859	4160,890	96,198	96198,433
	03:00:00	69,863	69863	4160,890	105,315	105314,789
	04:00:00	68,910	68910	4160,890	107,169	107169,075
	05:00:00	68,072	68072	4160,890	105,495	105495,003
	06:00:00	68,427	68427	4160,890	105,191	105190,865
	07:00:00	69,829	69829	4160,890	106,395	106395,248
	08:00:00	68,567	68567	4160,890	105,533	105533,173
	09:00:00	67,524	67524	4160,890	104,890	104890,419
	10:00:00	69,213	69213	4160,890	105,694	105693,962
	11:00:00	69,793	69793	4160,890	104,154	104154,114
	12:00:00	70,058	70058	4160,890	104,493	104493,271
	13:00:00	70,126	70126	4160,890	105,648	105648,216
	14:00:00	69,459	69459	4160,890	105,751	105750,877
	15:00:00	70,511	70511	4160,890	106,390	106390,457
	16:00:00	70,318	70318	4160,890	105,401	105401,100
	17:00:00	70,127	70127	4160,890	104,749	104749,283
	18:00:00	70,555	70555	4160,890	103,763	103763,344
	19:00:00	72,823	72823	4160,890	104,462	104461,670
	20:00:00	72,392	72392	4160,890	105,946	105945,808
	21:00:00	70,831	70831	4160,890	105,613	105613,182
	22:00:00	64,690	64690	4160,890	96,819	96818,604
23:00:00	65,725	65725	4160,890	96,609	96608,505	

Lampiran 3 Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai *Heat Rate* setelah *Overhaul* pada Bulan Desember 2022 dengan Beban Sebesar 105 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	mf (kg/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)	Pg (kW)
01/12/2022	00:00:00	65,921	65921	4160,890	105,591	105590,858
	01:00:00	66,774	66774	4160,890	105,066	105065,826
	02:00:00	66,341	66341	4160,890	104,658	104658,119
	03:00:00	66,042	66042	4160,890	105,320	105320,274
	04:00:00	66,366	66366	4160,890	104,869	104868,988
	05:00:00	66,410	66410	4160,890	105,070	105070,396
	06:00:00	66,278	66278	4160,890	104,861	104860,626
	07:00:00	66,966	66966	4160,890	104,945	104944,824
	08:00:00	67,547	67547	4160,890	106,922	106921,638
	09:00:00	66,515	66515	4160,890	105,468	105467,903
	10:00:00	66,300	66300	4160,890	105,201	105201,096
	11:00:00	66,594	66594	4160,890	105,613	105612,511
	12:00:00	66,171	66171	4160,890	105,058	105058,144
	13:00:00	66,818	66818	4160,890	104,882	104881,790
	14:00:00	68,575	68575	4160,890	105,737	105736,557
	15:00:00	67,598	67598	4160,890	107,105	107105,461
	16:00:00	67,511	67511	4160,890	107,647	107647,003
	17:00:00	67,556	67556	4160,890	107,157	107157,494
	18:00:00	66,814	66814	4160,890	106,779	106779,396
	19:00:00	68,330	68330	4160,890	107,369	107369,110
	20:00:00	67,979	67979	4160,890	107,218	107218,109
	21:00:00	66,643	66643	4160,890	106,760	106759,560
	22:00:00	67,192	67192	4160,890	107,457	107457,039
23:00:00	67,545	67545	4160,890	107,185	107184,700	
02/12/2022	00:00:00	67,882	67882	4160,890	107,011	107010,971
	01:00:00	67,468	67468	4160,890	107,038	107038,239
	02:00:00	67,630	67630	4160,890	106,858	106858,116
	03:00:00	67,285	67285	4160,890	106,566	106566,246
	04:00:00	68,305	68305	4160,890	107,171	107170,670
	05:00:00	68,072	68072	4160,890	107,678	107677,628
	06:00:00	67,825	67825	4160,890	107,717	107717,430
	07:00:00	67,349	67349	4160,890	106,849	106848,724
	08:00:00	67,485	67485	4160,890	106,978	106978,058
	09:00:00	68,229	68229	4160,890	107,204	107203,583
	10:00:00	69,589	69589	4160,890	106,965	106965,340

	11:00:00	68,237	68237	4160,890	107,898	107898,109
	12:00:00	68,739	68739	4160,890	107,079	107079,193
	13:00:00	67,836	67836	4160,890	106,651	106651,283
	14:00:00	68,827	68827	4160,890	108,413	108413,490
	15:00:00	68,141	68141	4160,890	107,573	107573,067
	16:00:00	68,315	68315	4160,890	107,265	107265,373
	17:00:00	67,542	67542	4160,890	105,909	105909,073
	18:00:00	67,546	67546	4160,890	106,262	106262,146
	19:00:00	68,107	68107	4160,890	107,553	107552,719
	20:00:00	68,178	68178	4160,890	107,295	107294,518
	21:00:00	67,908	67908	4160,890	106,888	106888,329
	22:00:00	68,624	68624	4160,890	106,214	106213,768
	23:00:00	68,126	68126	4160,890	106,070	106070,496
03/12/2022	00:00:00	68,179	68179	4160,890	104,678	104678,131
	01:00:00	68,269	68269	4160,890	106,533	106532,997
	02:00:00	69,580	69580	4160,890	105,767	105766,571
	03:00:00	68,760	68760	4160,890	107,076	107076,248
	04:00:00	68,963	68963	4160,890	106,930	106930,145
	05:00:00	68,019	68019	4160,890	107,284	107284,157
	06:00:00	68,795	68795	4160,890	106,891	106891,396
	07:00:00	68,869	68869	4160,890	106,565	106565,239
	08:00:00	68,886	68886	4160,890	106,267	106266,624
	09:00:00	68,719	68719	4160,890	107,386	107386,429
	10:00:00	68,051	68051	4160,890	106,239	106238,594
	11:00:00	68,388	68388	4160,890	106,715	106715,286
	12:00:00	69,129	69129	4160,890	106,820	106820,427
	13:00:00	68,889	68889	4160,890	107,552	107551,857
	14:00:00	68,119	68119	4160,890	106,276	106276,138
	15:00:00	68,560	68560	4160,890	107,654	107653,633
	16:00:00	68,663	68663	4160,890	106,725	106725,395
	17:00:00	68,244	68244	4160,890	106,347	106347,237
	18:00:00	68,219	68219	4160,890	106,651	106650,818
	19:00:00	68,884	68884	4160,890	106,863	106862,946
	20:00:00	68,393	68393	4160,890	106,401	106400,658
	21:00:00	68,719	68719	4160,890	106,144	106143,784
	22:00:00	69,112	69112	4160,890	107,239	107239,174
23:00:00	69,511	69511	4160,890	107,114	107114,197	

Lampiran 4 Data Pengamatan untuk Perhitungan Nilai *Heat Rate* pada Bulan Februari 2023 Beban 110 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	mf (kg/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)	Pg (kW)
01/02/2023	00:00:00	55,546	55546	4160,890	80,593	80592,911
	01:00:00	58,370	58370	4160,890	81,200	81199,638
	02:00:00	58,096	58096	4160,890	81,435	81434,868
	03:00:00	58,012	58012	4160,890	81,569	81569,405
	04:00:00	57,478	57478	4160,890	80,968	80968,460
	05:00:00	57,737	57737	4160,890	81,473	81473,068
	06:00:00	57,741	57741	4160,890	81,998	81998,474
	07:00:00	56,942	56942	4160,890	80,841	80841,072
	08:00:00	61,429	61429	4160,890	85,404	85404,114
	09:00:00	78,655	78655	4160,890	111,328	111328,178
	10:00:00	77,850	77850	4160,890	110,263	110263,000
	11:00:00	78,183	78183	4160,890	110,030	110030,350
	12:00:00	77,021	77021	4160,890	111,448	111447,945
	13:00:00	76,637	76637	4160,890	110,660	110660,088
	14:00:00	77,018	77018	4160,890	111,138	111137,596
	15:00:00	76,356	76356	4160,890	110,452	110452,126
	16:00:00	77,332	77332	4160,890	110,688	110688,110
	17:00:00	77,389	77389	4160,890	110,409	110409,218
	18:00:00	78,414	78414	4160,890	111,144	111143,906
	19:00:00	79,489	79489	4160,890	111,102	111102,135
	20:00:00	78,950	78950	4160,890	111,657	111657,166
	21:00:00	78,950	78950	4160,890	110,651	110650,894
	22:00:00	79,184	79184	4160,890	111,381	111380,882
23:00:00	75,958	75958	4160,890	109,971	109970,657	
02/02/2023	00:00:00	64,421	64421	4160,890	91,247	91247,002
	01:00:00	59,252	59252	4160,890	81,469	81469,093
	02:00:00	52,873	52873	4160,890	70,158	70158,318
	03:00:00	52,806	52806	4160,890	71,374	71374,321
	04:00:00	52,433	52433	4160,890	71,220	71219,795
	05:00:00	52,444	52444	4160,890	70,614	70613,869
	06:00:00	53,153	53153	4160,890	71,065	71065,384
	07:00:00	52,618	52618	4160,890	71,269	71269,447
	08:00:00	59,298	59298	4160,890	78,199	78198,540
	09:00:00	77,685	77685	4160,890	105,692	105692,001
	10:00:00	79,611	79611	4160,890	110,170	110169,830

	11:00:00	79,690	79690	4160,890	110,391	110390,984
	12:00:00	82,335	82335	4160,890	110,413	110412,674
	13:00:00	81,314	81314	4160,890	110,236	110236,137
	14:00:00	84,320	84320	4160,890	110,972	110972,359
	15:00:00	85,651	85651	4160,890	110,978	110978,119
	16:00:00	85,908	85908	4160,890	111,036	111035,957
	17:00:00	88,699	88699	4160,890	110,377	110377,403
	18:00:00	89,099	89099	4160,890	111,110	111109,802
	19:00:00	91,035	91035	4160,890	111,265	111264,824
	20:00:00	94,353	94353	4160,890	110,392	110392,189
	21:00:00	94,486	94486	4160,890	110,647	110647,026
	22:00:00	95,335	95335	4160,890	111,400	111400,078
	23:00:00	95,734	95734	4160,890	110,492	110491,608
03/02/2023	00:00:00	96,196	96196	4160,890	111,455	111455,460
	01:00:00	96,646	96646	4160,890	111,284	111283,661
	02:00:00	94,856	94856	4160,890	112,811	112810,875
	03:00:00	95,200	95200	4160,890	112,057	112057,037
	04:00:00	94,305	94305	4160,890	109,427	109427,483
	05:00:00	94,688	94688	4160,890	110,110	110109,863
	06:00:00	94,731	94731	4160,890	109,621	109620,949
	07:00:00	95,045	95045	4160,890	110,162	110162,201
	08:00:00	96,335	96335	4160,890	109,883	109883,049
	09:00:00	95,384	95384	4160,890	111,244	111243,523
	10:00:00	94,967	94967	4160,890	110,954	110953,583
	11:00:00	95,242	95242	4160,890	110,931	110930,779
	12:00:00	94,956	94956	4160,890	113,015	113014,709
	13:00:00	82,405	82405	4160,890	113,525	113524,910
	14:00:00	81,558	81558	4160,890	113,208	113207,954
	15:00:00	79,095	79095	4160,890	111,624	111623,901
	16:00:00	78,673	78673	4160,890	110,379	110379,295
	17:00:00	81,557	81557	4160,890	110,443	110442,726
	18:00:00	82,045	82045	4160,890	110,499	110499,023
	19:00:00	82,677	82677	4160,890	110,478	110478,127
	20:00:00	85,491	85491	4160,890	111,204	111203,590
	21:00:00	86,854	86854	4160,890	111,134	111134,407
	22:00:00	89,906	89906	4160,890	110,286	110285,973
23:00:00	90,582	90582	4160,890	111,700	111700,363	

Lampiran 5 Hasil Analisis Data Perhitungan *Heat Rate* Komisioning Awal pada Bulan Mei Tahun 2018 dengan Beban Sebesar 100 MW

Tanggal	Jam	mf (kg/h)	GCVbb (kJ/kg)	Pg (kW)	Heat Rate (kJ/kWh)
15/05/2018	00:00:00	45123	17409,164	77500,885	10135,987
	01:00:00	47296	17409,164	79006,142	10421,788
	02:00:00	51379	17409,164	88947,990	10056,087
	03:00:00	51542	17409,164	88519,646	10136,739
	04:00:00	50727	17409,164	88253,761	10006,476
	05:00:00	50912	17409,164	88242,775	10044,310
	06:00:00	50705	17409,164	88900,993	9929,317
	07:00:00	51093	17409,164	88168,655	10088,420
	08:00:00	51248	17409,164	88804,184	10046,672
	09:00:00	51750	17409,164	88546,890	10174,572
	10:00:00	51749	17409,164	89077,805	10113,688
	11:00:00	52024	17409,164	89068,314	10168,553
	12:00:00	51586	17409,164	88014,694	10203,532
	13:00:00	61670	17409,164	104796,997	10244,806
	14:00:00	63861	17409,164	111227,432	9995,390
	15:00:00	62799	17409,164	111588,036	9797,392
	16:00:00	62633	17409,164	111327,538	9794,365
	17:00:00	62889	17409,164	110747,604	9886,022
	18:00:00	62688	17409,164	109985,756	9922,680
	19:00:00	62488	17409,164	112519,119	9668,330
	20:00:00	62683	17409,164	111528,046	9784,652
	21:00:00	62475	17409,164	110738,235	9821,662
	22:00:00	62626	17409,164	110704,903	9848,376
23:00:00	62609	17409,164	110693,275	9846,793	
16/05/2018	00:00:00	48220	17409,164	85648,743	9801,334
	01:00:00	37543	17409,164	66576,309	9817,094
	02:00:00	31510	17409,164	52921,108	10365,777
	03:00:00	33089	17409,164	55446,400	10389,459
	04:00:00	33017	17409,164	55290,867	10395,916
	05:00:00	33062	17409,164	55349,731	10399,031
	06:00:00	33047	17409,164	55164,883	10429,060
	07:00:00	33529	17409,164	54863,724	10639,392
	08:00:00	33456	17409,164	55373,928	10518,414
	09:00:00	34585	17409,164	55620,037	10825,258
	10:00:00	34477	17409,164	56389,290	10644,261

	11:00:00	34025	17409,164	54501,099	10868,659
	12:00:00	33894	17409,164	56478,729	10447,536
	13:00:00	32974	17409,164	55037,441	10430,210
	14:00:00	32993	17409,164	55351,715	10376,814
	15:00:00	33605	17409,164	56021,477	10443,074
	16:00:00	33706	17409,164	56144,642	10451,525
	17:00:00	33532	17409,164	56123,383	10401,475
	18:00:00	33531	17409,164	55870,922	10448,074
	19:00:00	33715	17409,164	55284,992	10616,851
	20:00:00	33601	17409,164	55434,155	10552,378
	21:00:00	33526	17409,164	55395,237	10536,343
	22:00:00	33359	17409,164	55097,710	10540,376
	23:00:00	33639	17409,164	55294,376	10591,047
17/05/2018	00:00:00	33664	17409,164	55655,689	10530,086
	01:00:00	33504	17409,164	55252,331	10556,503
	02:00:00	33376	17409,164	55221,645	10522,167
	03:00:00	33543	17409,164	55400,543	10540,678
	04:00:00	33624	17409,164	55047,508	10633,859
	05:00:00	33320	17409,164	54721,062	10600,571
	06:00:00	33598	17409,164	55202,393	10595,679
	07:00:00	33735	17409,164	55927,902	10500,974
	08:00:00	33381	17409,164	55397,480	10490,321
	09:00:00	33522	17409,164	54685,753	10671,854
	10:00:00	33452	17409,164	54788,338	10629,458
	11:00:00	34018	17409,164	55484,356	10673,781
	12:00:00	34041	17409,164	55903,080	10600,848
	13:00:00	33946	17409,164	56134,087	10527,804
	14:00:00	34026	17409,164	55853,905	10605,493
	15:00:00	34108	17409,164	55583,954	10682,856
	16:00:00	34004	17409,164	55212,551	10721,838
	17:00:00	33896	17409,164	55195,427	10690,992
	18:00:00	34018	17409,164	55204,498	10727,812
	19:00:00	34203	17409,164	54931,870	10839,620
	20:00:00	34000	17409,164	55462,330	10672,348
	21:00:00	34166	17409,164	55678,997	10682,564
	22:00:00	33852	17409,164	56335,670	10461,219
23:00:00	33980	17409,164	56032,791	10557,350	

Lampiran 6 Hasil Analisis Data Perhitungan *Heat Rate* sebelum *Overhaul* pada Bulan Agustus Tahun 2022 dengan Beban Sebesar 110 MW

Tanggal	Jam	mf (kg/h)	GCVbb (kJ/kg)	Pg (kW)	Heat Rate (kJ/kWh)
02/08/2022	00:00:00	64905	17409,164	94225,945	11991,741
	01:00:00	65482	17409,164	95384,834	11951,427
	02:00:00	65369	17409,164	96999,657	11732,170
	03:00:00	57962	17409,164	84060,753	12004,122
	04:00:00	57534	17409,164	85654,335	11693,827
	05:00:00	57505	17409,164	85187,538	11751,951
	06:00:00	58155	17409,164	85242,264	11877,097
	07:00:00	58534	17409,164	84666,267	12035,893
	08:00:00	58631	17409,164	85637,245	11919,051
	09:00:00	60114	17409,164	85148,628	12290,704
	10:00:00	59192	17409,164	86173,233	11958,211
	11:00:00	58186	17409,164	84481,796	11990,333
	12:00:00	58790	17409,164	86057,297	11892,974
	13:00:00	58865	17409,164	86012,589	11914,437
	14:00:00	59211	17409,164	85977,776	11989,238
	15:00:00	58813	17409,164	84984,138	12047,900
	16:00:00	58850	17409,164	84613,853	12108,393
	17:00:00	59213	17409,164	84363,640	12219,193
	18:00:00	58938	17409,164	86029,037	11926,846
	19:00:00	58796	17409,164	86130,211	11884,221
	20:00:00	57581	17409,164	84922,508	11804,158
	21:00:00	58205	17409,164	85148,979	11900,391
	22:00:00	57913	17409,164	84498,634	11931,775
	23:00:00	58489	17409,164	84085,899	12109,620
03/08/2022	00:00:00	58226	17409,164	85110,596	11909,917
	01:00:00	58484	17409,164	83916,534	12133,014
	02:00:00	58786	17409,164	84607,079	12096,045
	03:00:00	66581	17409,164	96057,709	12066,979
	04:00:00	67266	17409,164	97211,113	12046,436
	05:00:00	64962	17409,164	97487,450	11600,788
	06:00:00	64398	17409,164	96044,022	11672,921
	07:00:00	64945	17409,164	95573,997	11829,965
	08:00:00	64795	17409,164	95309,105	11835,513
	09:00:00	65992	17409,164	95744,019	11999,396
	10:00:00	65628	17409,164	95716,095	11936,729

	11:00:00	65929	17409,164	95284,752	12045,636
	12:00:00	65447	17409,164	95630,981	11914,239
	13:00:00	65626	17409,164	96493,317	11840,080
	14:00:00	65026	17409,164	95349,564	11872,614
	15:00:00	64743	17409,164	95549,278	11796,173
	16:00:00	65028	17409,164	95347,580	11873,251
	17:00:00	64864	17409,164	95483,795	11826,422
	18:00:00	65009	17409,164	94968,163	11917,182
	19:00:00	65328	17409,164	95089,706	11960,413
	20:00:00	65391	17409,164	95347,031	11939,656
	21:00:00	65432	17409,164	95318,657	11950,609
	22:00:00	64761	17409,164	96554,497	11676,608
	23:00:00	64710	17409,164	96170,433	11714,113
04/08/2022	00:00:00	64186	17409,164	96167,015	11619,560
	01:00:00	64202	17409,164	96763,596	11550,947
	02:00:00	64859	17409,164	96198,433	11737,688
	03:00:00	69863	17409,164	105314,789	11548,780
	04:00:00	68910	17409,164	107169,075	11194,108
	05:00:00	68072	17409,164	105495,003	11233,425
	06:00:00	68427	17409,164	105190,865	11324,800
	07:00:00	69829	17409,164	106395,248	11425,866
	08:00:00	68567	17409,164	105533,173	11311,047
	09:00:00	67524	17409,164	104890,419	11207,351
	10:00:00	69213	17409,164	105693,962	11400,259
	11:00:00	69793	17409,164	104154,114	11665,800
	12:00:00	70058	17409,164	104493,271	11672,083
	13:00:00	70126	17409,164	105648,216	11555,592
	14:00:00	69459	17409,164	105750,877	11434,717
	15:00:00	70511	17409,164	106390,457	11538,013
	16:00:00	70318	17409,164	105401,100	11614,477
	17:00:00	70127	17409,164	104749,283	11654,954
	18:00:00	70555	17409,164	103763,344	11837,566
	19:00:00	72823	17409,164	104461,670	12136,401
	20:00:00	72392	17409,164	105945,808	11895,545
	21:00:00	70831	17409,164	105613,182	11675,672
	22:00:00	64690	17409,164	96818,604	11631,977
23:00:00	65725	17409,164	96608,505	11843,935	

Lampiran 7 Hasil Analisis Data Perhitungan *Heat Rate* setelah *Overhaul* pada Bulan Desember Tahun 2022 dengan Beban Sebesar 105 MW

Tanggal	Jam	mf (kg/h)	GCVbb (kJ/kg)	Pg (kW)	Heat Rate (kJ/kWh)
01/12/2022	00:00:00	65921	17409,164	105590,858	10868,719
	01:00:00	66774	17409,164	105065,826	11064,292
	02:00:00	66341	17409,164	104658,119	11035,445
	03:00:00	66042	17409,164	105320,274	10916,536
	04:00:00	66366	17409,164	104868,988	11017,317
	05:00:00	66410	17409,164	105070,396	11003,582
	06:00:00	66278	17409,164	104860,626	11003,555
	07:00:00	66966	17409,164	104944,824	11108,972
	08:00:00	67547	17409,164	106921,638	10998,166
	09:00:00	66515	17409,164	105467,903	10979,310
	10:00:00	66300	17409,164	105201,096	10971,627
	11:00:00	66594	17409,164	105612,511	10977,300
	12:00:00	66171	17409,164	105058,144	10965,151
	13:00:00	66818	17409,164	104881,790	11091,066
	14:00:00	68575	17409,164	105736,557	11290,687
	15:00:00	67598	17409,164	107105,461	10987,457
	16:00:00	67511	17409,164	107647,003	10918,172
	17:00:00	67556	17409,164	107157,494	10975,312
	18:00:00	66814	17409,164	106779,396	10893,220
	19:00:00	68330	17409,164	107369,110	11079,174
	20:00:00	67979	17409,164	107218,109	11037,874
	21:00:00	66643	17409,164	106759,560	10867,373
	22:00:00	67192	17409,164	107457,039	10885,729
23:00:00	67545	17409,164	107184,700	10970,747	
02/12/2022	00:00:00	67882	17409,164	107010,971	11043,489
	01:00:00	67468	17409,164	107038,239	10973,342
	02:00:00	67630	17409,164	106858,116	11018,243
	03:00:00	67285	17409,164	106566,246	10991,969
	04:00:00	68305	17409,164	107170,670	11095,655
	05:00:00	68072	17409,164	107677,628	11005,811
	06:00:00	67825	17409,164	107717,430	10961,747
	07:00:00	67349	17409,164	106848,724	10973,288
	08:00:00	67485	17409,164	106978,058	10982,308
	09:00:00	68229	17409,164	107203,583	11079,882
10:00:00	69589	17409,164	106965,340	11325,954	

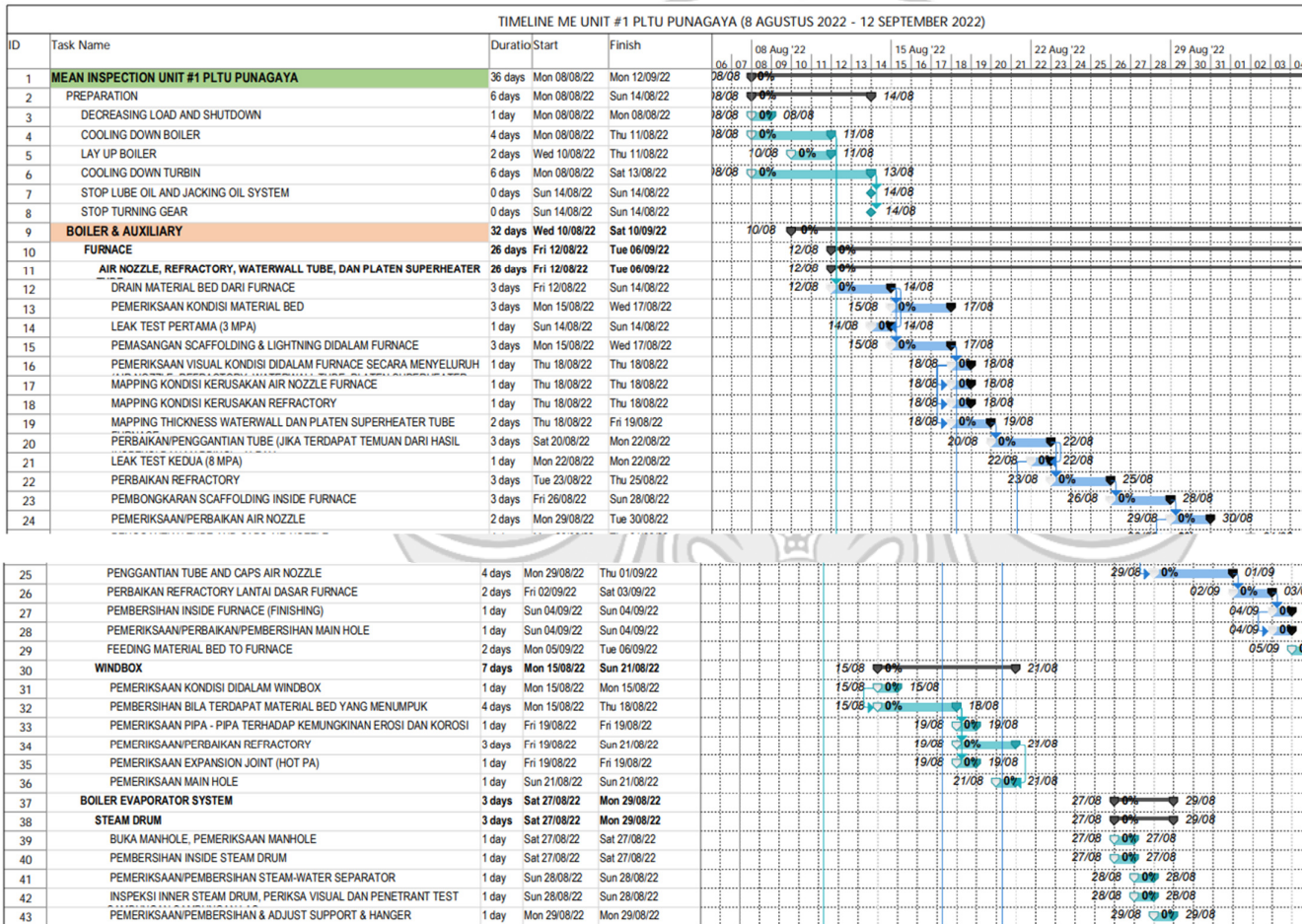
	11:00:00	68237	17409,164	107898,109	11009,924
	12:00:00	68739	17409,164	107079,193	11175,680
	13:00:00	67836	17409,164	106651,283	11073,091
	14:00:00	68827	17409,164	108413,490	11052,245
	15:00:00	68141	17409,164	107573,067	11027,652
	16:00:00	68315	17409,164	107265,373	11087,587
	17:00:00	67542	17409,164	105909,073	11102,468
	18:00:00	67546	17409,164	106262,146	11066,132
	19:00:00	68107	17409,164	107552,719	11024,158
	20:00:00	68178	17409,164	107294,518	11062,299
	21:00:00	67908	17409,164	106888,329	11060,338
	22:00:00	68624	17409,164	106213,768	11247,911
	23:00:00	68126	17409,164	106070,496	11181,354
03/12/2022	00:00:00	68179	17409,164	104678,131	11338,922
	01:00:00	68269	17409,164	106532,997	11156,186
	02:00:00	69580	17409,164	105766,571	11452,871
	03:00:00	68760	17409,164	107076,248	11179,377
	04:00:00	68963	17409,164	106930,145	11227,849
	05:00:00	68019	17409,164	107284,157	11037,546
	06:00:00	68795	17409,164	106891,396	11204,501
	07:00:00	68869	17409,164	106565,239	11250,829
	08:00:00	68886	17409,164	106266,624	11285,215
	09:00:00	68719	17409,164	107386,429	11140,559
	10:00:00	68051	17409,164	106238,594	11151,351
	11:00:00	68388	17409,164	106715,286	11156,631
	12:00:00	69129	17409,164	106820,427	11266,298
	13:00:00	68889	17409,164	107551,857	11150,964
	14:00:00	68119	17409,164	106276,138	11158,591
	15:00:00	68560	17409,164	107653,633	11087,161
	16:00:00	68663	17409,164	106725,395	11200,328
	17:00:00	68244	17409,164	106347,237	11171,674
	18:00:00	68219	17409,164	106650,818	11135,742
	19:00:00	68884	17409,164	106862,946	11222,020
	20:00:00	68393	17409,164	106400,658	11190,404
	21:00:00	68719	17409,164	106143,784	11270,964
	22:00:00	69112	17409,164	107239,174	11219,679
23:00:00	69511	17409,164	107114,197	11297,482	

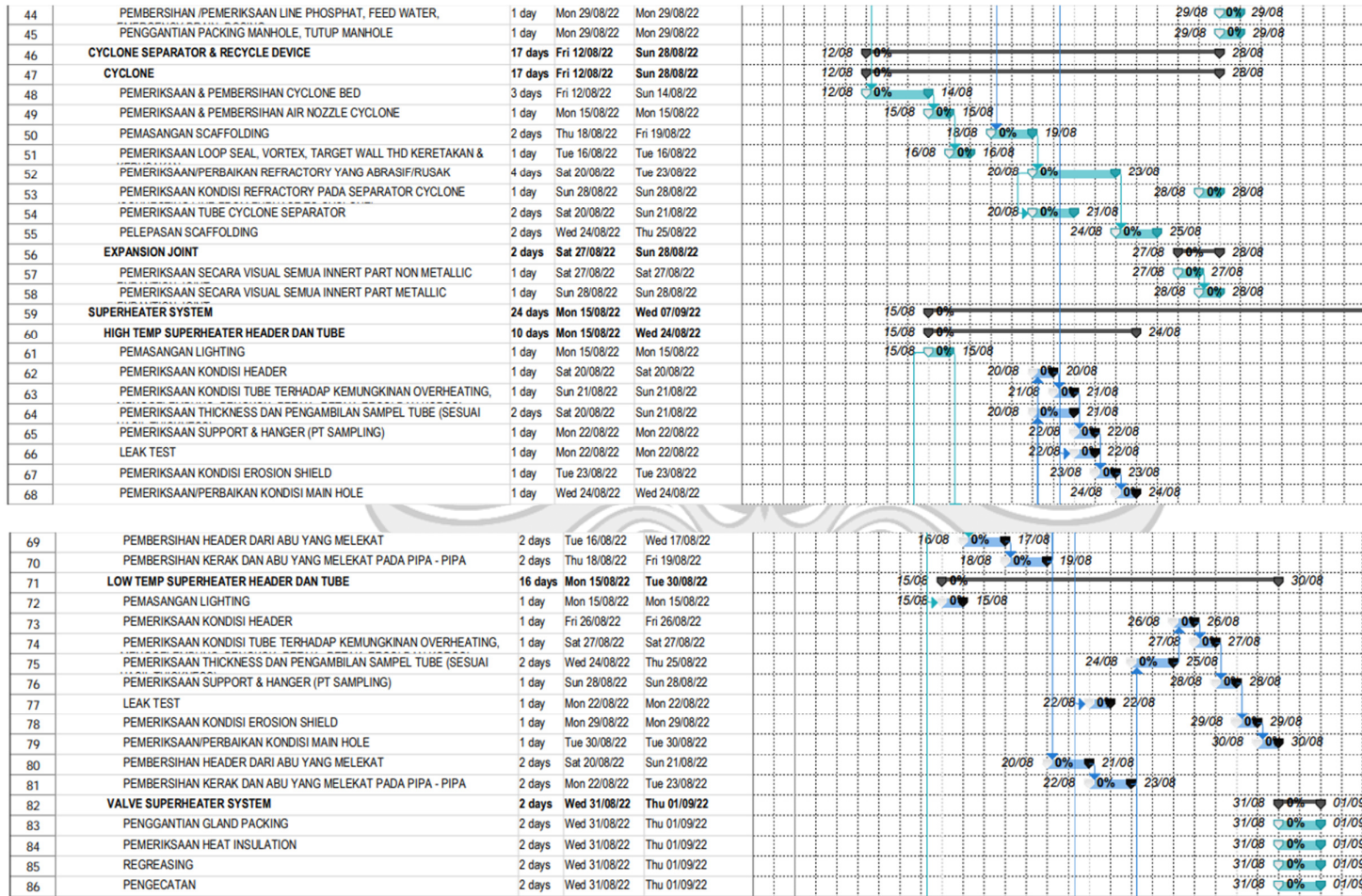
Lampiran 8 Hasil Analisis Data Perhitungan *Heat Rate* pada Bulan Februari Tahun 2023 Beban 110 MW

Tanggal	Jam	mf (kg/h)	GCVbb (kJ/kg)	Pg (kW)	Heat Rate (kJ/kWh)
01/02/2023	00:00:00	55,546	17409,164	80592,911	11998,708
	01:00:00	58,370	17409,164	81199,638	12514,539
	02:00:00	58,096	17409,164	81434,868	12419,674
	03:00:00	58,012	17409,164	81569,405	12381,285
	04:00:00	57,478	17409,164	80968,460	12358,347
	05:00:00	57,737	17409,164	81473,068	12337,308
	06:00:00	57,741	17409,164	81998,474	12259,019
	07:00:00	56,942	17409,164	80841,072	12262,397
	08:00:00	61,429	17409,164	85404,114	12522,016
	09:00:00	78,655	17409,164	111328,178	12299,896
	10:00:00	77,850	17409,164	110263,000	12291,572
	11:00:00	78,183	17409,164	110030,350	12370,189
	12:00:00	77,021	17409,164	111447,945	12031,417
	13:00:00	76,637	17409,164	110660,088	12056,626
	14:00:00	77,018	17409,164	111137,596	12064,424
	15:00:00	76,356	17409,164	110452,126	12035,042
	16:00:00	77,332	17409,164	110688,110	12162,877
	17:00:00	77,389	17409,164	110409,218	12202,597
	18:00:00	78,414	17409,164	111143,906	12282,531
	19:00:00	79,489	17409,164	111102,135	12455,483
	20:00:00	78,950	17409,164	111657,166	12309,652
	21:00:00	78,950	17409,164	110650,894	12421,547
	22:00:00	79,184	17409,164	111380,882	12376,633
23:00:00	75,958	17409,164	109970,657	12024,652	
02/02/2023	00:00:00	64,421	17409,164	91247,002	12291,039
	01:00:00	59,252	17409,164	81469,093	12661,479
	02:00:00	52,873	17409,164	70158,318	13120,040
	03:00:00	52,806	17409,164	71374,321	12880,101
	04:00:00	52,433	17409,164	71219,795	12816,926
	05:00:00	52,444	17409,164	70613,869	12929,475
	06:00:00	53,153	17409,164	71065,384	13021,008
	07:00:00	52,618	17409,164	71269,447	12853,035
	08:00:00	59,298	17409,164	78198,540	13201,451
	09:00:00	77,685	17409,164	105692,001	12796,040
10:00:00	79,611	17409,164	110169,830	12580,278	

	11:00:00	79,690	17409,164	110390,984	12567,451
	12:00:00	82,335	17409,164	110412,674	12982,026
	13:00:00	81,314	17409,164	110236,137	12841,671
	14:00:00	84,320	17409,164	110972,359	13227,991
	15:00:00	85,651	17409,164	110978,119	13436,068
	16:00:00	85,908	17409,164	111035,957	13469,364
	17:00:00	88,699	17409,164	110377,403	13989,952
	18:00:00	89,099	17409,164	111109,802	13960,363
	19:00:00	91,035	17409,164	111264,824	14243,896
	20:00:00	94,353	17409,164	110392,189	14879,752
	21:00:00	94,486	17409,164	110647,026	14866,346
	22:00:00	95,335	17409,164	111400,078	14898,560
	23:00:00	95,734	17409,164	110491,608	15083,959
03/02/2023	00:00:00	96,196	17409,164	111455,460	15025,603
	01:00:00	96,646	17409,164	111283,661	15119,316
	02:00:00	94,856	17409,164	112810,875	14638,337
	03:00:00	95,200	17409,164	112057,037	14790,309
	04:00:00	94,305	17409,164	109427,483	15003,285
	05:00:00	94,688	17409,164	110109,863	14970,856
	06:00:00	94,731	17409,164	109620,949	15044,449
	07:00:00	95,045	17409,164	110162,201	15020,165
	08:00:00	96,335	17409,164	109883,049	15262,721
	09:00:00	95,384	17409,164	111243,523	14927,201
	10:00:00	94,967	17409,164	110953,583	14900,850
	11:00:00	95,242	17409,164	110930,779	14947,005
	12:00:00	94,956	17409,164	113014,709	14627,361
	13:00:00	82,405	17409,164	113524,910	12636,844
	14:00:00	81,558	17409,164	113207,954	12542,040
	15:00:00	79,095	17409,164	111623,901	12335,874
	16:00:00	78,673	17409,164	110379,295	12408,436
	17:00:00	81,557	17409,164	110442,726	12855,859
	18:00:00	82,045	17409,164	110499,023	12926,255
	19:00:00	82,677	17409,164	110478,127	13028,292
	20:00:00	85,491	17409,164	111203,590	13383,840
	21:00:00	86,854	17409,164	111134,407	13605,607
	22:00:00	89,906	17409,164	110285,973	14192,091
	23:00:00	90,582	17409,164	111700,363	14117,774

Lampiran 9 Data Overhaul Mean Inspection #1 PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW





87	PRIMARY DESUPERHEATER	2 days	Fri 02/09/22	Sat 03/09/22				02/09	0%	03/09
88	PEMERIKSAAN KONDISI WATER PIPE	2 days	Fri 02/09/22	Sat 03/09/22				02/09	0%	03/09
89	PEMERIKSAAN KONDISI DRAINAGE / EXHAUST PIPE	2 days	Fri 02/09/22	Sat 03/09/22				02/09	0%	03/09
90	PEMERIKSAAN KONDISI WELDING JOINT PADA PIPA	2 days	Fri 02/09/22	Sat 03/09/22				02/09	0%	03/09
91	SECONDARY DESUPERHEATER	2 days	Sun 04/09/22	Mon 05/09/22				04/09	0%	05/09
92	PEMERIKSAAN KONDISI WATER PIPE	2 days	Sun 04/09/22	Mon 05/09/22				04/09	0%	05/09
93	PEMERIKSAAN KONDISI DRAINAGE / EXHAUST PIPE	2 days	Sun 04/09/22	Mon 05/09/22				04/09	0%	05/09
94	PEMERIKSAAN KONDISI WELDING JOINT PADA PIPA	2 days	Sun 04/09/22	Mon 05/09/22				04/09	0%	05/09
95	VALVE DE SUPERHEATER SYSTEM	2 days	Tue 06/09/22	Wed 07/09/22				06/09		06/09
96	PENGGANTIAN GLAND PACKING	2 days	Tue 06/09/22	Wed 07/09/22				06/09		06/09
97	PEMERIKSAAN HEAT INSULATION	2 days	Tue 06/09/22	Wed 07/09/22				06/09		06/09
98	REGREASING	2 days	Tue 06/09/22	Wed 07/09/22				06/09		06/09
99	PENGECATAN	2 days	Tue 06/09/22	Wed 07/09/22				06/09		06/09
100	ECONOMIZER SYSTEM	26 days	Mon 15/08/22	Fri 09/09/22				15/08	0%	03/09
101	ECONOMIZER TUBE	20 days	Mon 15/08/22	Sat 03/09/22				15/08	0%	03/09
102	PEMASANGAN LIGHTING	1 day	Mon 15/08/22	Mon 15/08/22				15/08	0%	15/08
103	PEMERIKSAAN KONDISI HEADER (PT SAMPLING)	1 day	Tue 30/08/22	Tue 30/08/22				30/08	0%	30/08
104	PEMERIKSAAN KONDISI TUBE TERHADAP KEMUNGKINAN OVERHEATING.	1 day	Wed 31/08/22	Wed 31/08/22				31/08	0%	31/08
105	PEMERIKSAAN THICKNESS DAN PENGAMBILAN SAMPEL TUBE (SESUAI)	2 days	Sun 28/08/22	Mon 29/08/22				28/08	0%	29/08
106	PEMERIKSAAN SUPPORT & HANGER	1 day	Thu 01/09/22	Thu 01/09/22				01/09	0%	01/09
107	LEAK TEST	1 day	Mon 22/08/22	Mon 22/08/22				22/08	0%	22/08
108	PEMERIKSAAN KONDISI EROSION SHIELD	1 day	Fri 02/09/22	Fri 02/09/22				02/09	0%	02/09
109	PEMERIKSAAN/PERBAIKAN KONDISI MAIN HOLE	1 day	Sat 03/09/22	Sat 03/09/22				03/09	0%	03/09
110	PEMBERSIHAN HEADER DARI ABU YANG MELEKAT	2 days	Wed 24/08/22	Thu 25/08/22				24/08	0%	25/08
111	PEMBERSIHAN KERAK DAN ABU YANG MELEKAT PADA PIPA - PIPA	2 days	Fri 26/08/22	Sat 27/08/22				26/08	0%	27/08
112	VALVE ECONOMIZER SYSTEM	2 days	Thu 08/09/22	Fri 09/09/22						
113	PENGGANTIAN GLAND PACKING	2 days	Thu 08/09/22	Fri 09/09/22						
114	PEMERIKSAAN HEAT INSULATION	2 days	Thu 08/09/22	Fri 09/09/22						



Lampiran 10 Salah Satu Perhitungan Efisiensi *Boiler* Menggunakan Metode Tidak Langsung dan *Heat Rate* pada *Microsoft Excel*

The image displays two side-by-side screenshots of a Microsoft Excel spreadsheet titled "Perhitungan Efisiensi Boiler".

Left Screenshot (Sheet C50):

- Formula bar: $=E34 * E33 * (E32 - E26) / E21 * 100$
- Table content:

	A	B	C	D	E
44	EFISIENSI BOILER MENGGUNAKAN METODE TIDAK LANGSUNG				
45	1	Kebutuhan udara teoritis	5,53	kg/kg bahan bakar	
46	2	Persen kelebihan udara yang disuplai (EA)	22,02	%	
47	3	Massa udara aktual yang disuplai udara dalam 1 kg bahan bakar (AA.S)	6,75	kg/kg bahan bakar	
48					
49	Total losses (seluruh kehilangan panas)				
50		Kehilangan panas karena gas buang kering (L1)	3,86	%	
51		Kehilangan panas karena pembentukan air dari H ₂ dalam bahan bakar (L2)	5,07	%	
52		Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar (L3)	4,96	%	
53		Kehilangan panas karena embun di udara (L4)	0,15	%	
54	4	Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna (L5)	0,00	%	
55					
56		Radiation loss	52,11	W/m ²	
57			44,81	kCal/m ²	
58		Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi (L6)	0,02	%	
59		Kehilangan panas karena fly ash tidak terbakar (L7)	0,02	%	
60		Kehilangan panas karena bottom ash tidak terbakar (L8)	0,10	%	
61					
62					
63					
64					
65					

Right Screenshot (Sheet C69):

- Formula bar: $=100 - C50 - C52 - C54 - C56 - C58 - C63 - C65 - C67$
- Table content:

	A	B	C	D	E
49	Total losses (seluruh kehilangan panas)				
50		Kehilangan panas karena gas buang kering (L1)	3,86	%	
51		Kehilangan panas karena pembentukan air dari H ₂ dalam bahan bakar (L2)	5,07	%	
52		Kehilangan panas karena embun dalam bahan bakar (L3)	4,96	%	
53		Kehilangan panas karena embun di udara (L4)	0,15	%	
54	4	Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna (L5)	0,00	%	
55					
56		Radiation loss	52,11	W/m ²	
57			44,81	kCal/m ²	
58		Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi (L6)	0,02	%	
59		Kehilangan panas karena fly ash tidak terbakar (L7)	0,02	%	
60		Kehilangan panas karena bottom ash tidak terbakar (L8)	0,10	%	
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69	5	Efisiensi boiler	85,84	%	
70					

Perhitungan Heat Rate (1) - Excel

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View Help Tell me what you want to do

Clipboard Font Alignment Number Styles Cells Editing

16 =D6*F6/H6

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
4																
5		Tanggal	Jam	mf (ton/h)	mf (kg/h)	GCVbb (kCal/kg)	GCVbb (kJ/kg)	Pg (MW)	Pg (kW)	Heat Rate (kJ/kWh)						
6	01/02/2022	00:00:00	55,546	55546	4160,890	17409,164	80,593	80592,911	11998,708							
7		01:00:00	58,370	58370	4160,890	17409,164	81,200	81199,638	12514,539							
8		02:00:00	58,096	58096	4160,890	17409,164	81,435	81434,868	12419,674							
9		03:00:00	58,012	58012	4160,890	17409,164	81,569	81569,405	12381,285		Beban	110 MW				
10		04:00:00	57,478	57478	4160,890	17409,164	80,968	80968,460	12358,347		Heat Rate (kJ/kWh)					
11		05:00:00	57,737	57737	4160,890	17409,164	81,473	81473,068	12337,308		01/02/2023	02/02/2023	03/02/2023			
12		06:00:00	57,741	57741	4160,890	17409,164	81,998	81998,474	12259,019		12268,268	13399,928	14096,265			
13		07:00:00	56,942	56942	4160,890	17409,164	80,841	80841,072	12262,397		13254,820					
14		08:00:00	61,429	61429	4160,890	17409,164	85,404	85404,114	12522,016		mf (kg/h)					
15		09:00:00	78,655	78655	4160,890	17409,164	111,328	111328,178	12299,896		70364	75190	89975	78510		
16		10:00:00	77,850	77850	4160,890	17409,164	110,263	110263,000	12291,572		Pg (kW)					
17		11:00:00	78,183	78183	4160,890	17409,164	110,030	110030,350	12370,189		99908,511	97174,448	111143,060	102742,006		
18		12:00:00	77,021	77021	4160,890	17409,164	111,448	111447,945	12031,417							
19		13:00:00	76,637	76637	4160,890	17409,164	110,660	110660,088	12056,626							
20	14:00:00	77,018	77018	4160,890	17409,164	111,138	111137,596	12064,424								
21	15:00:00	76,356	76356	4160,890	17409,164	110,452	110452,126	12035,042								
22	16:00:00	77,332	77332	4160,890	17409,164	110,688	110688,110	12162,877								
23	17:00:00	77,389	77389	4160,890	17409,164	110,409	110409,218	12202,597								
24	18:00:00	78,414	78414	4160,890	17409,164	111,144	111143,906	12282,531								
25	19:00:00	79,489	79489	4160,890	17409,164	111,102	111102,135	12455,483								
26	20:00:00	78,950	78950	4160,890	17409,164	111,657	111657,166	12309,652								
27	21:00:00	78,950	78950	4160,890	17409,164	110,651	110650,894	12421,547								

Komisioning Awal Sebelum Overhaul Setelah Overhaul Operasi Terkini Sheet1



Lampiran 11 Software dan Website Bantu yang Digunakan dalam Analisis Data

The image shows two side-by-side screenshots of the engineeringtoolbox.com website. The left screenshot displays the 'Specific Heat Converter' tool, which allows users to convert between various units of specific heat capacity. The right screenshot shows a table of specific heat values for water vapor (H₂O) at different temperatures.

Specific Heat Converter
 The calculator below can be used to convert between some common specific heat units

Value (use period as decimal point):

J/gK
 kJ/kgK
 J/kg°C
 kJ/kg°C
 cal/g°C
 cal/kg°C
 kcal/kg°C
 Btu/lb_m°F

1 J/kgC =>

- 0.001 J/gK
- 0.001 kJ/kgK
- 1 J/kgC
- 0.001 kJ/kgC
- 0.000239 cal/gC
- 0.239 cal/kgC
- 0.000239 kcal/kgC
- 0.000239 btu/lbF

Unit Converter

Temperature

 °C
 K
 °F

Length

 m
 km
 in
 ft
 yards
 miles
 naut miles

Area

 m²
 km²
 in²

Water Vapor - H₂O

Specific heat of Water Vapor - H₂O - at temperatures ranging 175 - 6000 K:

Temperature - T - (K)	Specific Heat - c _p - (kJ/(kg K))
175	1.850
200	1.851
225	1.852
250	1.855
275	1.859
300	1.864
325	1.871
350	1.880
375	1.890
400	1.901
450	1.926
500	1.954
550	1.984
600	2.015
650	2.047
700	2.080
750	2.113
800	2.147
850	2.182
900	2.217
950	2.252
1000	2.288
1050	2.323

Specific Heat - Online Unit Conv... Flue gas properties table Water Vapor - Specific Heat vs. Te...

pipeflowcalculations.com/tables/flue-gas.xhtml

Cara Menghitung E... Perhitungan efisien... Korosi - Wikipedia... Pengertian Korosi ... Penyebab utama er... 13 Macam Jenis Ca... Apa yang dimaksud... 18 Macam Cacat La...

Temperature

Temperature [°C]	c_p [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]	$\mu \cdot 10^6$ [Pa·s]	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]
0.0	1.042	1.295	15.8	12.2
100.0	1.068	0.95	20.4	21.54
200.0	1.097	0.748	24.5	32.8
300.0	1.122	0.617	28.2	45.81
400.0	1.151	0.525	31.7	60.38
500.0	1.185	0.457	34.8	76.3
600.0	1.214	0.405	37.9	93.61
700.0	1.239	0.363	40.7	112.1
800.0	1.264	0.33	43.4	131.8
900.0	1.29	0.301	45.9	152.5
1000.0	1.306	0.275	48.4	174.3
1100.0	1.323	0.257	50.7	197.1
1200.0	1.34	0.24	53.0	221.0

Fluid properties tables

- GASES
- LIQUIDS
- GAS FUELS
- LIQUID FUELS
- AIR
- WATER
- FLUE GASES
- STEAM



RETScreen Expert

File Location Facility Energy Cost Emission Finance Risk Data Analytics Report Custom

Language Share Subscribe Help eLearning

Step 1 - Consumption | Production Step 2 - Factors of influence Step 3 - Data processing Step 4 - Summary | Portfolio

Indonesia (-5,6°N, 119,5°E) Elevation: 10 m (Facility)

RETScreen - Data

Data

- Electricity consumption
 - Notes
 - Natural gas
 - Water consumption
 - Weather - Canada - QC - Varennes
 - Facility size
 - Event log
 - Weather - Indonesia
 - NASA data
 - Weather - Indonesia (2)
 - NASA data
- Summary
 - Consumption summary
 - Water consumption summary
 - User-defined summary

Go to: Analytics

Period	Begin	End	Duration Days	Air temper °C	Air temp °C	Air temp °C	Relative humi %	Precipit mm	Daily solar r _s kWh/m ² /d	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s	Earth temperature °C	Comment:
1	2022-08-01	2022-08-01	1	27,5	25,8	29,8	80,8%	3,3	5,06	100,7	3,5	28,0	
2	2022-08-02	2022-08-02	1	27,5	26,0	29,3	81,2%	2,4	4,58	100,8	4,7	28,0	
3	2022-08-03	2022-08-03	1	27,6	26,0	29,8	77,3%	0,2	6,29	100,8	5,8	28,1	
4	2022-08-04	2022-08-04	1	27,1	25,2	29,3	78,0%	0,0	6,28	100,9	4,8	28,1	
5	2022-08-05	2022-08-05	1	27,0	25,3	29,1	74,6%	0,1	6,50	100,8	4,9	28,0	
6	2022-08-06	2022-08-06	1	26,7	25,3	28,3	77,4%	0,1	5,62	100,9	3,8	28,1	
7	2022-08-07	2022-08-07	1	26,8	25,1	28,4	75,1%	0,1	4,92	100,9	2,1	28,2	
8	2022-08-08	2022-08-08	1	27,1	25,8	28,8	77,8%	7,7	4,91	100,9	3,8	28,5	
9	2022-08-09	2022-08-09	1	27,2	25,8	28,9	79,1%	4,2	5,30	100,8	5,0	28,1	
10	2022-08-10	2022-08-10	1	27,4	26,1	29,1	80,5%	2,9	5,16	100,8	4,3	28,1	
11	2022-08-11	2022-08-11	1	27,6	26,1	29,3	79,5%	2,7	4,38	100,8	3,5	28,5	
12	2022-08-12	2022-08-12	1	27,5	25,9	29,4	79,8%	0,9	4,57	100,8	3,8	28,6	
13	2022-08-13	2022-08-13	1	27,6	26,5	29,2	81,9%	2,0	4,68	100,8	3,7	28,2	
14	2022-08-14	2022-08-14	1	27,3	26,2	29,0	79,9%	2,1	6,06	100,9	3,7	27,7	
15	2022-08-15	2022-08-15	1	27,5	25,9	29,7	76,3%	0,1	6,44	100,9	6,2	28,2	
16	2022-08-16	2022-08-16	1	27,2	25,7	29,1	74,9%	0,0	6,46	101,0	5,5	27,7	
17	2022-08-17	2022-08-17	1	27,6	25,7	29,9	73,9%	0,1	5,77	101,0	5,4	28,4	
18	2022-08-18	2022-08-18	1	27,6	25,9	29,7	77,1%	0,7	5,59	100,9	5,6	28,5	
19	2022-08-19	2022-08-19	1	27,6	26,1	29,7	76,9%	0,1	6,33	100,9	6,5	28,4	
20	2022-08-20	2022-08-20	1	27,0	25,5	29,0	73,8%	0,0	6,68	100,9	7,5	27,9	
21	2022-08-21	2022-08-21	1	27,1	25,1	29,6	75,7%	0,0	6,07	100,8	7,2	27,9	
22	2022-08-22	2022-08-22	1	27,1	25,7	29,3	74,9%	0,0	6,27	100,9	7,1	28,0	
23	2022-08-23	2022-08-23	1	26,7	24,6	28,9	76,3%	0,0	6,58	100,9	6,3	27,9	
24	2022-08-24	2022-08-24	1	26,9	24,9	29,1	75,5%	0,1	4,84	100,9	6,5	28,0	
25	2022-08-25	2022-08-25	1	27,2	25,6	29,0	77,9%	1,6	4,39	100,9	6,3	27,8	
26	2022-08-26	2022-08-26	1	27,4	25,7	29,6	76,8%	0,1	6,31	100,8	6,2	28,2	

28°C Cerah

13:51 19/05/2023



Lampiran 12 Surat Keterangan Pelaksanaan Penelitian



Nomor : GF0004335 Jeneponto, 5 Mei 2023
Sifat : Biasa
Lampiran : 1 Lembar

Kepada
Yth. Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang

Di

Makassar

Perihal : Konfirmasi Izin Penelitian Mahasiswa

Menindaklanjuti surat dari Politeknik Negeri Ujung Pandang Nomor : 0853/PL10/PK.03.08/2023 Perihal Permohonan Pengambilan Data, maka dengan ini kami sampaikan pada perinsipnya kami izinkan untuk melakukan Permohonan Pengambilan Data di Lingkungan PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya dengan data mahasiswa sebagai berikut :

NO	NAMA	STAMBUK	KETERANGAN
1	Ainun Zakina	44219001	Analisis Efisiensi Boiler

Perlu kami sampaikan juga selama pelaksanaan magang, Mahasiswa wajib menggunakan mematuhi peraturan yang berlaku di lingkungan PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya.

Demikian kami sampaikan atas perhatian dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.

MANAGER UPK PUNAGAYA



YUNAN KURNIAWAN

PT PLN NUSANTARA POWER, UNIT PEMBANGKITAN PUNAGAYA

Desa Punagaya, Kec. Bangkala, Kab. Jeneponto, Sulawesi Selatan
Telp : -
Faks : -

Lampiran 13 Data untuk Perhitungan Efisiensi *Boiler* dan *Heat Rate* yang diperoleh dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Punagaya 2x100 MW Unit 1

DATA UNTUK PERHITUNGAN EFISIENSI BOILER MENGGUNAKAN METODE TIDAK LANGSUNG PADA PT PLN NUSANTARA POWER UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN PUNAGAYA 2x100 MW UNIT 1

Data Komisioning Awal tahun 2018
Pada Beban 100 MW

No	Keterangan	Simbol	Satuan	Data
				15 Mei 2018
1	Jumlah steam yang dihasilkan per jam	ms	kg/jam	370200
2	Entalpi superheated steam	hg	kJ/kg	3459,86
3	Entalpi air umpan	hf	kJ/kg	916,86
4	Konsumsi bahan bakar per jam	mf	kg/jam	62450
5	Nilai kalor bahan bakar	GCV _{BB}	kCal/kg	4160,890

[Handwritten Signature]

Data Sebelum Overhaul tahun 2022
Pada Beban 110 MW

No	Keterangan	Simbol	Satuan	Data
				2-4 Agustus 2022
1	Analisis <i>ultimate</i> bahan bakar	H ₂		3,34
2		O ₂		18,15
3		S		0,11
4		C		41,04
5	Persentase O ₂ dalam gas buang		%	4,26
6	Persentase CO ₂ dalam gas buang		%	14,58
7	Persentase CO dalam gas buang		%	0
8	Analisis proximate massa uap air	M	kg/kg bahan bakar	32,82
9	Nilai kalor bahan bakar	GCV _{BB}	kCal/kg	4160,890
10	Massa gas buang kering	m	kg/kg bahan bakar	7,31
11	Panas spesifik gas buang	C _{pf}	(kCal/kg°C)	0,257
12	Panas spesifik dari superheated steam	C _{ps}	kCal/kg°C	0,514
13	Temperatur gas buang	T _f	°C	121,63
14	Temperatur udara sekitar	T _a	°C	27,13
15	Kelembaban udara		kg/kg udara kering	0,0201
16	Kecepatan angin	V _m	m/s	4,06
17	Temperatur sekitar boiler	T _s	°C	33,05
18	Luas total penampang boiler	A total	m ²	1035,3
19	Konsumsi bahan bakar per jam	m _f	kg/jam	69840
20	Total abu per kg bahan bakar		kg/kg bahan bakar	0,04
21	Fly ash split			0,67
22	Bottom ash split			0,33
23	Massa residu	m _r	kg/kg bahan bakar	0,027
24	Entalpi ash split	h _{fa}	kJ/kg	90,04
25	Entalpi bottom split	h _{ba}	kJ/kg	880,28

Ditentukan berdasarkan T_f = 121,63 C

Ditentukan berdasarkan Temperatur steam = 531,66 C

aplikasi retscreen

Data Setelah Overhaul tahun 2022
Pada Beban 105 MW

No	Keterangan	Simbol	Satuan	Data
				Desember 2022
1	Analisis <i>ultimate</i> bahan bakar	H ₂		3,34
2		O ₂		18,15
3		S		0,11
4		C		41,04
5	Persentase O ₂ dalam gas buang		%	4,26
6	Persentase CO ₂ dalam gas buang		%	14,58
7	Persentase CO dalam gas buang		%	0
8	Analisis proximate massa uap air	M	kg/kg bahan bakar	32,82
9	Nilai kalor bahan bakar	GCV _{BB}	kCal/kg	4160,890
10	Massa gas buang kering	m	kg/kg bahan bakar	7,31
11	Panas spesifik gas buang	C _{ptf}	(kCal/kg°C)	0,257
12	Panas spesifik dari superheated steam	C _{ps}	kCal/kg°C	0,514
13	Temperatur gas buang	T _f	°C	121,63
14	Temperatur udara sekitar	T _a	°C	27,13
15	Kelembaban udara		kg/kg udara kering	0,0201
16	Kecepatan angin	V _m	m/s	4,06
17	Temperatur sekitar boiler	T _s	°C	33,05
18	Luas total penampang boiler	A total	m ²	1035,3
19	Konsumsi bahan bakar per jam	m _f	kg/jam	69840
20	Total abu per kg bahan bakar		kg/kg bahan bakar	0,04
21	Fly ash split			0,8
22	Bottom ash split			0,2
23	Massa residu	mr	kg/kg bahan bakar	0,027
24	Entalpi ash split	hfa	kJ/kg	90,02
25	Entalpi bottom split	hba	kJ/kg	880,7

Ditentukan berdasarkan T_f = 121,63 C

Ditentukan berdasarkan Temperatur steam = 531,66 C

aplikasi retscreen

Data Operasi Terkini tahun 2023
Pada Beban 110 MW

No	Keterangan	Simbol	Satuan	Data
				Februari 2023
1	Analisis <i>ultimate</i> bahan bakar	H ₂		3,72
2		O ₂		12,83
3		S		0,24
4		C		44,26
5	Persentase O ₂ dalam gas buang		%	3,79
6	Persentase CO ₂ dalam gas buang		%	20,25
7	Persentase CO dalam gas buang		%	0
8	Analisis proximate massa uap air	M	kg/kg bahan bakar	32,75
9	Nilai kalor bahan bakar	GCV _{BB}	kCal/kg	4160,890
10	Massa gas buang kering	m	kg/kg bahan bakar	7,05
11	Panas spesifik gas buang	C _{pf}	(kCal/kg°C)	0,256
12	Panas spesifik dari superheated steam	C _{ps}	kCal/kg°C	0,514
13	Temperatur gas buang	T _f	°C	111,22
14	Temperatur udara sekitar	T _a	°C	22,34
15	Kelembaban udara		kg/kg udara kering	0,02
16	Kecepatan angin	V _m	m/s	4,94
17	Temperatur sekitar boiler	T _s	°C	27
18	Luas total penampang boiler	A total	m ²	1035,3
19	Konsumsi bahan bakar per jam	m _f	kg/jam	68981,76
20	Total abu per kg bahan bakar		kg/kg bahan bakar	0,06
21	Fly ash split			0,67
22	Bottom ash split			0,33
23	Massa residu	mr	kg/kg bahan bakar	0,06
24	Entalpi ash split	hfa	kJ/kg	67,87
25	Entalpi bottom split	hba	kJ/kg	862,96

Ditentukan berdasarkan Tf = 111,22 C

Ditentukan berdasarkan Temperatur steam = 533,04 C

aplikasi retscreen

DATA UNTUK PERHITUNGAN HEAT RATE PADA PT PLN NUSANTARA
POWER UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN PUNAGAYA 2x110 MW UNIT

Data Komisining Awal tahun 2018
Beban 110 MW

Tanggal	Jam	m ³ (ton/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)
15/05/2018	00:00:00	45.123	4160.890	77,501
01:00:00	47.296	4160.890	79,006	
02:00:00	51.179	4160.890	88,948	
03:00:00	51.542	4160.890	88,520	
04:00:00	50.727	4160.890	88,254	
05:00:00	50.912	4160.890	88,243	
06:00:00	50.705	4160.890	88,901	
07:00:00	51.093	4160.890	88,169	
08:00:00	51.248	4160.890	88,804	
09:00:00	51.750	4160.890	88,547	
10:00:00	51.749	4160.890	89,078	
11:00:00	52,024	4160,890	89,068	
12:00:00	51,586	4160,890	88,015	
13:00:00	61,670	4160,890	104,797	
14:00:00	63,861	4160,890	111,227	
15:00:00	62,799	4160,890	111,588	
16:00:00	62,633	4160,890	111,328	
17:00:00	62,889	4160,890	110,748	
18:00:00	62,688	4160,890	109,986	
19:00:00	62,488	4160,890	112,519	
20:00:00	62,683	4160,890	111,528	
21:00:00	62,475	4160,890	110,738	
22:00:00	62,626	4160,890	110,705	
23:00:00	62,609	4160,890	110,693	
00:00:00	48,220	4160,890	85,649	
01:00:00	37,543	4160,890	66,376	
02:00:00	31,510	4160,890	52,921	
03:00:00	33,089	4160,890	55,446	
04:00:00	33,017	4160,890	55,291	
05:00:00	33,062	4160,890	55,360	
06:00:00	33,047	4160,890	55,165	
07:00:00	33,529	4160,890	54,864	
08:00:00	33,456	4160,890	55,374	
09:00:00	34,585	4160,890	55,620	
10:00:00	34,477	4160,890	56,389	
11:00:00	34,025	4160,890	54,501	
12:00:00	33,894	4160,890	56,479	
13:00:00	32,974	4160,890	55,037	
14:00:00	32,993	4160,890	55,352	
15:00:00	33,605	4160,890	56,021	
16:00:00	33,706	4160,890	56,145	
17:00:00	33,532	4160,890	56,123	
18:00:00	33,531	4160,890	55,871	
19:00:00	33,715	4160,890	55,285	
20:00:00	33,601	4160,890	55,434	
21:00:00	33,526	4160,890	55,395	
22:00:00	33,359	4160,890	55,098	
23:00:00	33,639	4160,890	55,294	
00:00:00	33,664	4160,890	55,656	
01:00:00	33,504	4160,890	55,252	
02:00:00	33,376	4160,890	55,222	
03:00:00	33,543	4160,890	55,401	
04:00:00	33,624	4160,890	55,048	
05:00:00	33,320	4160,890	54,721	
06:00:00	33,598	4160,890	55,202	
07:00:00	33,735	4160,890	55,928	
08:00:00	33,381	4160,890	55,397	
09:00:00	33,522	4160,890	54,686	
10:00:00	33,452	4160,890	54,788	
11:00:00	34,018	4160,890	55,484	
12:00:00	34,041	4160,890	55,903	
13:00:00	33,946	4160,890	56,134	
14:00:00	34,026	4160,890	55,854	
15:00:00	34,108	4160,890	55,384	
16:00:00	34,004	4160,890	55,213	
17:00:00	33,896	4160,890	55,195	
18:00:00	34,018	4160,890	55,204	
19:00:00	34,203	4160,890	54,932	
20:00:00	34,000	4160,890	55,462	
21:00:00	34,166	4160,890	55,631	
22:00:00	33,852	4160,890	56,331	
23:00:00	33,980	4160,890	56,331	

Data Before Overhaul tahun 2022
Beban 110 MW

Tanggal	Jam	m ³ (ton/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)
02/08/2022	00:00:00	64,905	4160,890	94,226
01:00:00	65,482	4160,890	95,385	
02:00:00	65,369	4160,890	97,000	
03:00:00	57,962	4160,890	84,061	
04:00:00	57,534	4160,890	85,654	
05:00:00	57,505	4160,890	85,188	
06:00:00	58,155	4160,890	85,242	
07:00:00	58,534	4160,890	84,666	
08:00:00	58,631	4160,890	85,637	
09:00:00	60,114	4160,890	85,149	
10:00:00	59,192	4160,890	86,173	
11:00:00	58,186	4160,890	84,482	
12:00:00	58,790	4160,890	86,057	
13:00:00	58,865	4160,890	86,013	
14:00:00	59,211	4160,890	85,978	
15:00:00	58,813	4160,890	84,984	
16:00:00	58,850	4160,890	84,614	
17:00:00	59,213	4160,890	84,364	
18:00:00	58,938	4160,890	86,029	
19:00:00	58,796	4160,890	86,130	
20:00:00	57,581	4160,890	84,923	
21:00:00	58,205	4160,890	85,149	
22:00:00	57,913	4160,890	84,499	
23:00:00	58,489	4160,890	84,086	
00:00:00	58,226	4160,890	85,111	
01:00:00	58,484	4160,890	83,917	
02:00:00	58,786	4160,890	84,607	
03:00:00	66,581	4160,890	96,058	
04:00:00	67,266	4160,890	97,211	
05:00:00	64,962	4160,890	97,487	
06:00:00	64,398	4160,890	96,044	
07:00:00	64,945	4160,890	95,574	
08:00:00	64,795	4160,890	95,309	
09:00:00	65,992	4160,890	95,744	
10:00:00	65,628	4160,890	95,716	
11:00:00	65,929	4160,890	95,285	
12:00:00	65,447	4160,890	95,631	
13:00:00	65,626	4160,890	96,493	
14:00:00	65,026	4160,890	95,350	
15:00:00	64,743	4160,890	95,549	
16:00:00	65,028	4160,890	95,348	
17:00:00	64,864	4160,890	95,484	
18:00:00	65,009	4160,890	94,968	
19:00:00	65,328	4160,890	95,090	
20:00:00	65,391	4160,890	95,347	
21:00:00	65,432	4160,890	95,319	
22:00:00	64,761	4160,890	96,554	
23:00:00	64,710	4160,890	96,170	
00:00:00	64,186	4160,890	96,167	
01:00:00	64,202	4160,890	96,764	
02:00:00	64,859	4160,890	96,198	
03:00:00	69,863	4160,890	105,315	
04:00:00	68,910	4160,890	107,169	
05:00:00	68,072	4160,890	105,495	
06:00:00	68,427	4160,890	105,191	
07:00:00	69,829	4160,890	106,395	
08:00:00	68,567	4160,890	105,533	
09:00:00	67,524	4160,890	104,890	
10:00:00	69,213	4160,890	105,694	
11:00:00	69,793	4160,890	104,154	
12:00:00	70,058	4160,890	104,493	
13:00:00	70,126	4160,890	105,648	
14:00:00	69,459	4160,890	103,751	
15:00:00	70,511	4160,890	106,390	
16:00:00	70,318	4160,890	105,401	
17:00:00	70,127	4160,890	104,749	
18:00:00	70,555	4160,890	103,763	
19:00:00	72,823	4160,890	104,462	
20:00:00	73,392	4160,890	105,946	
21:00:00	70,831	4160,890	105,611	
22:00:00	64,690	4160,890	96,811	
23:00:00	65,725	4160,890	96,631	

Data After Overhaul tahun 2022
Beban 105 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)
01/12/2023	00:00:00	65,921	4160,890	105,591
	01:00:00	66,774	4160,890	105,066
	02:00:00	66,341	4160,890	104,658
	03:00:00	66,042	4160,890	105,320
	04:00:00	66,366	4160,890	104,869
	05:00:00	66,410	4160,890	105,070
	06:00:00	66,278	4160,890	104,861
	07:00:00	66,966	4160,890	104,945
	08:00:00	67,547	4160,890	106,922
	09:00:00	66,515	4160,890	105,468
	10:00:00	66,300	4160,890	105,201
	11:00:00	66,594	4160,890	105,613
	12:00:00	66,171	4160,890	105,058
	13:00:00	66,818	4160,890	104,882
	14:00:00	68,575	4160,890	105,737
	15:00:00	67,598	4160,890	107,105
	16:00:00	67,511	4160,890	107,647
	17:00:00	67,556	4160,890	107,157
	18:00:00	66,814	4160,890	106,779
	19:00:00	68,330	4160,890	107,369
	20:00:00	67,979	4160,890	107,218
	21:00:00	66,643	4160,890	106,760
	22:00:00	67,192	4160,890	107,437
	23:00:00	67,545	4160,890	107,185
02/12/2023	00:00:00	67,882	4160,890	107,011
	01:00:00	67,468	4160,890	107,038
	02:00:00	67,630	4160,890	106,858
	03:00:00	67,285	4160,890	106,566
	04:00:00	68,305	4160,890	107,171
	05:00:00	68,072	4160,890	107,678
	06:00:00	67,825	4160,890	107,717
	07:00:00	67,349	4160,890	106,849
	08:00:00	67,485	4160,890	106,978
	09:00:00	68,229	4160,890	107,204
	10:00:00	69,580	4160,890	106,965
	11:00:00	68,237	4160,890	107,898
	12:00:00	68,739	4160,890	107,079
	13:00:00	67,836	4160,890	106,651
	14:00:00	68,827	4160,890	108,413
	15:00:00	68,141	4160,890	107,573
	16:00:00	68,315	4160,890	107,265
	17:00:00	67,542	4160,890	105,909
	18:00:00	67,546	4160,890	106,262
	19:00:00	68,107	4160,890	107,553
	20:00:00	68,178	4160,890	107,295
	21:00:00	67,908	4160,890	106,888
	22:00:00	68,624	4160,890	106,214
	23:00:00	68,126	4160,890	106,070
03/12/2023	00:00:00	68,179	4160,890	104,678
	01:00:00	68,269	4160,890	106,533
	02:00:00	69,580	4160,890	105,767
	03:00:00	68,760	4160,890	107,076
	04:00:00	68,963	4160,890	106,930
	05:00:00	68,019	4160,890	107,284
	06:00:00	68,795	4160,890	106,891
	07:00:00	68,869	4160,890	106,565
	08:00:00	68,886	4160,890	106,267
	09:00:00	68,719	4160,890	107,386
	10:00:00	68,051	4160,890	106,239
	11:00:00	68,388	4160,890	106,715
	12:00:00	69,129	4160,890	106,820
	13:00:00	68,889	4160,890	107,552
	14:00:00	68,119	4160,890	106,276
	15:00:00	68,560	4160,890	107,654
	16:00:00	68,663	4160,890	106,725
	17:00:00	68,244	4160,890	106,347
	18:00:00	68,219	4160,890	106,651
	19:00:00	68,884	4160,890	106,863
	20:00:00	68,393	4160,890	106,401
	21:00:00	68,719	4160,890	106,144
	22:00:00	69,112	4160,890	107,231
	23:00:00	69,511	4160,890	107,111

Data Operasi Terkini tahun 2023
Beban 110 MW

Tanggal	Jam	mf (ton/h)	GCVbb (kCal/kg)	Pg (MW)
01/02/2022	00:00:00	55,546	4160,890	80,593
	01:00:00	58,370	4160,890	81,200
	02:00:00	58,096	4160,890	81,435
	03:00:00	58,012	4160,890	81,569
	04:00:00	57,478	4160,890	80,968
	05:00:00	57,737	4160,890	81,473
	06:00:00	57,741	4160,890	81,598
	07:00:00	56,942	4160,890	80,841
	08:00:00	61,429	4160,890	85,404
	09:00:00	78,655	4160,890	111,328
	10:00:00	77,850	4160,890	110,263
	11:00:00	78,183	4160,890	110,030
	12:00:00	77,021	4160,890	111,448
	13:00:00	76,637	4160,890	110,660
	14:00:00	77,018	4160,890	111,138
	15:00:00	76,356	4160,890	110,452
	16:00:00	77,332	4160,890	110,688
	17:00:00	77,389	4160,890	110,409
	18:00:00	78,414	4160,890	111,144
	19:00:00	79,489	4160,890	111,102
	20:00:00	78,950	4160,890	111,657
	21:00:00	78,950	4160,890	110,651
	22:00:00	79,184	4160,890	111,381
	23:00:00	75,958	4160,890	109,971
02/02/2022	00:00:00	64,421	4160,890	91,247
	01:00:00	59,252	4160,890	91,469
	02:00:00	52,873	4160,890	70,158
	03:00:00	52,806	4160,890	71,374
	04:00:00	52,433	4160,890	71,220
	05:00:00	52,444	4160,890	70,614
	06:00:00	53,153	4160,890	71,065
	07:00:00	52,618	4160,890	71,269
	08:00:00	59,258	4160,890	78,159
	09:00:00	77,685	4160,890	105,692
	10:00:00	79,611	4160,890	110,170
	11:00:00	79,690	4160,890	110,391
	12:00:00	82,335	4160,890	110,413
	13:00:00	81,314	4160,890	110,236
	14:00:00	84,320	4160,890	110,972
	15:00:00	85,651	4160,890	110,978
	16:00:00	85,908	4160,890	111,036
	17:00:00	88,699	4160,890	110,377
	18:00:00	89,099	4160,890	111,110
	19:00:00	91,035	4160,890	111,265
	20:00:00	94,353	4160,890	110,392
	21:00:00	94,486	4160,890	110,647
	22:00:00	95,335	4160,890	111,400
	23:00:00	95,734	4160,890	110,492
03/02/2022	00:00:00	96,196	4160,890	111,455
	01:00:00	96,646	4160,890	111,284
	02:00:00	94,856	4160,890	112,811
	03:00:00	95,200	4160,890	112,057
	04:00:00	94,305	4160,890	109,427
	05:00:00	94,688	4160,890	110,110
	06:00:00	94,731	4160,890	109,621
	07:00:00	95,045	4160,890	110,162
	08:00:00	96,335	4160,890	109,883
	09:00:00	95,384	4160,890	111,244
	10:00:00	94,967	4160,890	110,954
	11:00:00	95,242	4160,890	110,931
	12:00:00	94,956	4160,890	113,015
	13:00:00	82,405	4160,890	113,525
	14:00:00	81,558	4160,890	113,208
	15:00:00	79,095	4160,890	111,624
	16:00:00	78,673	4160,890	110,379
	17:00:00	81,557	4160,890	110,443
	18:00:00	82,045	4160,890	110,499
	19:00:00	82,677	4160,890	110,478
	20:00:00	85,491	4160,890	111,204
	21:00:00	86,854	4160,890	111,154
	22:00:00	89,906	4160,890	110,282
	23:00:00	90,382	4160,890	111,702

Lampiran 14 Hasil Perhitungan Efisiensi *Boiler* dan *Heat Rate* dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW Unit 1

Hasil Perhitungan Efisiensi *Boiler* dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW Unit 1

Sebelum *Overhaul* Bulan Agustus 2022

Row #	Efficiency Type	Unit	Value 1	Value 2	Value 3	Formula	
347	η_{Bg} (HHV)	Boiler Gross Efficiency (HHV Basis) Measured	%	87,17	88,72	88,98	$(100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13)) / ((H1) + (B1)) * 100) - (L10) - (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
348	η_{Bg} (LHV)	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Measured	%	95,49	95,81	95,88	$(100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13) + (L14) + (L15) + (L16) + (L17) + (L18) + (L19) + (L2) + (L3) + (H1) + (B1)) * 100) - (L10) - (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
Correction of Efficiency Boiler							
349	η_{Bf} (HHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (HHV Basis) Corrected	%	87,79	89,16	89,25	$(100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13) - (B1)) / ((H1) + 100 + (L10) + (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
350	η_{Bf} (LHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (LHV Basis) Corrected	%	96,21	96,32	96,21	$100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13) - (B1)) / ((H1) + 100 + (L10) + (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
351	η_{Bg} (HHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (HHV Basis) Corrected	%	87,35	88,77	88,84	$(100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13) + (H1) + (B1)) * 100) - (L10) - (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
352	η_{Bg} (LHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Corrected	%	95,69	95,86	95,73	$(100 - (((L1) + (L2) + (L3) + (L4) + (L5) + (L6) + (L7) + (L8) + (L9) + (L12) + (L13) + (H1) + (B1)) * 100) - (L10) - (L11)) * ((Qro) / ((Qro) - (B2)))$
Qri : Boiler Heat Input							
366	Qri	Boiler heat input	kJ/h	963.211.991,08	1.038.968.980,88	1.127.466.425,80	
367	Qri	Boiler heat input	MBtu/h	912,95	984,75	1.068,63	$(Qro) / ((\eta_{Bf}) / 100)$

Page 11

Setelah *Overhaul* Bulan Desember 2022

12. Heat Rate Calculation PLTU Pungaya Unit 1 110 MW DESEMBER 2022_After Overhaul - Excel

Formula Bar: $= (100 - (((F193 + F194 + F200 + F210 + F224 + F242 + F243 + F253 + F270 + F277) / (F10 + F304) * 100) + F226 + F258 + F264)) * (F337 / (F337 - F318))$

	A	C	D	E	F	G	H
344	g	Bg (LHV)	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Measured	%	95,88	93,86	$(100 - ((L11 + L12) + (L13 + L14) + (L15 + L16) + (L17 + L18) + (L19 + L20) + (L21 + L22) + (L23 + L24) + (L25) * 100) / (L10 + L11) * 100) / ((Q_{in}) / (Q_{out}) - 1) * 100$
345	Correction of Efficiency Boiler						
346	g	Bf (HHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (HHV Basis) Corrected	%	89,25	88,02	$100 - ((L11 + L12) + (L13 + L14) + (L15 + L16) + (L17 + L18) + (L19) + (L12) + (L13) + (L14) + (L15) * 100) / (L10 + L11) * 100) / ((Q_{in}) / (Q_{out}) - 1) * 100$
347	g	Df (LHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (LHV Basis) Corrected	%	96,21	94,78	$100 - ((L11 + L12) + (L13 + L14) + (L15 + L16) + (L17 + L18) + (L19) + (L12) + (L13) + (L14) + (L15) * 100) / (L10 + L11) * 100) / ((Q_{in}) / (Q_{out}) - 1) * 100$
348	g	Bg (HHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (HHV Basis) Corrected	%	88,04	85,42	$(100 - ((L11 + L12) + (L13 + L14) + (L15 + L16) + (L17 + L18) + (L19) + (L12) + (L13) + (L14) + (L15) * 100) / (L10 + L11) * 100) / ((Q_{in}) / (Q_{out}) - 1) * 100$
349	g	Bg (LHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Corrected	%	95,73	94,05	$(100 - ((L11 + L12) + (L13 + L14) + (L15 + L16) + (L17 + L18) + (L19) + (L12) + (L13) + (L14) + (L15) * 100) / (L10 + L11) * 100) / ((Q_{in}) / (Q_{out}) - 1) * 100$
351	Qin - Boiler Heat Input						
352	Qin	Boiler heat input		kJ/h	1.127.485.425,80	1.212.814.152,48	$(Q_{in}) / (10^6)$
353				Mekwh	1.088.63	1.149,53	
354	Flowrate Fuel Deviation						
355	MFC	Flowrate Fuel Calculated		kg/h	65.536,80	71.008,55	$(Q_{in}) / (H)$
356	MF	Flowrate Fuel Measured		kg/h	63.841,84	60.875,04	Measured
357	ΔMF	Flowrate Fuel Deviation		kg/h	-4.305,04	11.133,51	$(MFC) - (MF)$
358	%ΔMF	Flowrate Fuel Deviation		%	-6,15	18,35	$100 * ((ΔMF) / (MF))$

9. Turbine Cor 10. Boiler Cor 11. Cp 12. fct 13. fcb 14. Boiler Data 15. Turbine Data SPW 16. n Boiler Heat Loss Calc.



Operasi Terkini Bulan Februari 2023

Perhitungan data HR Input-Output & Heat Loss Data 2023 - Excel

	A	C	D	E	F	G	H	I	
347		η Bg (HHV)	Boiler Gross Efficiency (HHV Basis) Measured	%			88,37	$(100 - ((([L1] - ([L2] - [L3] + [L4] + [L5] + [L6] - [L7] - [L8] - [L9] - [L12] - [L18] + [H7] + [B1]) * 100) + ([L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
349		η Bg (LHV)	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Measured	%			95,33	$(100 - ((([L4] - [L2] - [L3] - [L4] - [L5] - [L6] - [L7] - [L8] - [L9] - [L12] - [L13] + [H7] + [B1]) * 100) + ([L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
349	Correction of Efficiency Boiler								
350		η Bf (HHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (HHV Basis) Corrected	%			88,88	$(100 - ((([L1] - [L2] + [L3] - [L4] + [L5] + [L6] + [L7] + [L8] + [L9] + [L12] - [L13] + [B1]) / ([H7] + 100 + [L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
351		η Bf (LHV) Cr	Boiler Fuel Efficiency (LHV Basis) Corrected	%			95,93	$100 - ((([L1] - [L2] - [L3] - [L4] + [L5] + [L6] - [L7] + [L8] + [L9] - [L12] - [L13] + [B1]) / ([H7] + 100 + [L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
352		η Bg (HHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (HHV Basis) Corrected	%			88,28	$(100 - ((([L1] - [L2] - [L3] - [L4] + [L5] + [L6] - [L7] - [L8] - [L9] - [L12] - [L13] + [H7] + [B1]) * 100) + ([L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
353		η Bg (LHV) Cr	Boiler Gross Efficiency (LHV Basis) Corrected	%			95,24	$(100 - ((([L4] - [L2] - [L3] - [L4] + [L5] + [L6] - [L7] - [L8] - [L9] - [L12] - [L13] + [H7] + [B1]) * 100) + ([L10] + [L11])) * ([Qro] / ([Qro] - [B2])))$	
365	Q_{ri} : Boiler Heat Input								
366		Q _{ri}	Boiler heat input				1.272.797.379,03		
367								$[Qro] / ([H8] / 100)$	

Page 11

Coal #1 HR HL (FW BASE) 16. η Boiler Heat Loss Calc. Elektrik #1 Ikhtislar Laporan (LAB) ...

Hasil Perhitungan *Heat Rate* dari PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangunan Punagaya 2x100 MW Unit 1

Komisioning Awal Tahun 2018

PUNAGAYA #1																	
TANGGAL	JAM	LOAD		KALOR BB kcal/kg	FLOW BB t/h	MAIN STEAM				FEED WATER				HEAT RATE (DATA)			
		GROSS	NETTO			P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	%	kJ/kWh	kcal/kWh	
15-May-18	5/15/18 9:00	09:00	88,547	79,533	4160,890	51,750	8,753	528,981	290,676	3462,643	9,668	199,696	318,659	854,429	-0,449	8292,056	1900,523
	5/15/18 10:00	10:00	89,078	79,354	4160,890	51,749	8,792	528,862	292,232	3461,931	9,713	206,363	322,704	884,222	-0,331	8154,069	1947,566
	5/15/18 11:00	11:00	89,068	79,780	4160,890	52,024	8,807	527,448	292,346	3458,267	9,725	205,775	322,105	881,590	-0,097	8162,772	1949,645
	5/15/18 12:00	12:00	88,015	78,925	4160,890	51,586	8,827	527,855	288,318	3459,057	9,729	201,163	318,529	860,987	-0,425	8215,224	1962,173
	5/15/18 13:00	13:00	104,797	93,809	4160,890	61,670	9,045	527,579	349,024	3456,011	10,216	210,615	389,012	903,517	-0,096	8156,259	1948,089
	5/15/18 14:00	14:00	111,227	100,285	4160,890	63,861	8,955	537,576	370,728	3481,750	10,197	216,102	410,818	928,289	-0,270	8176,254	1952,865
	5/15/18 15:00	15:00	111,588	100,405	4160,890	62,799	8,913	539,836	370,048	3487,779	10,126	217,201	402,809	933,249	-0,282	8197,334	1957,900
	5/15/18 16:00	16:00	111,328	99,960	4160,890	62,633	8,879	534,054	369,323	3473,827	10,123	213,308	401,772	915,622	-0,030	8219,835	1963,274
	5/15/18 17:00	17:00	110,748	98,841	4160,890	62,889	8,929	529,179	371,022	3461,242	10,184	215,348	407,461	924,871	5,561	8192,923	1956,846
	5/15/18 18:00	18:00	109,386	97,938	4160,890	62,688	8,882	526,625	368,906	3455,419	10,124	212,803	405,935	913,343	5,611	8218,955	1963,064
	5/15/18 19:00	19:00	112,519	100,334	4160,890	62,488	8,993	539,831	372,366	3486,939	10,245	215,666	412,645	926,329	5,475	8142,384	1944,775
	5/15/18 20:00	20:00	111,528	100,808	4160,890	62,689	8,939	532,288	371,597	3468,844	10,176	210,832	407,473	904,476	-0,361	8253,186	1971,240
	5/15/18 21:00	21:00	110,738	99,633	4160,890	62,475	8,932	527,942	371,257	3458,126	10,185	217,211	409,004	933,314	-0,150	8146,452	1945,747
	5/15/18 22:00	22:00	110,705	100,088	4160,890	62,626	8,933	525,632	371,040	3452,373	10,165	211,708	409,079	908,420	-0,115	8214,199	1961,928
5/15/18 23:00	23:00	110,693	99,635	4160,890	62,609	8,946	523,084	371,064	3445,907	10,215	216,200	409,540	928,738	-0,417	8115,177	1938,277	
AVERAGE														8197,156	1957,857		



Sebelum Overhaul Bulan Agustus 2022

PUNAGAYA #1																	
TANGGAL	JAM	LOAD		KALOR BB	FLOW BB	MAIN STEAM				FEED WATER				HEAT RATE (DATA)			
		GROSS	NETTO	kcal/kg	t/h	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	%	kJ/kWh	kcal/kWh	
04-Aug-22	8/4/22 9:00	09:00	104,890	93,776	4160,890	67,524	8,685	591,654	951,154	3469,967	10,141	206,042	384,748	882,957	0,953	8378,033	2001,059
	8/4/22 10:00	10:00	105,694	94,864	4160,890	69,213	8,733	531,151	353,628	3468,229	10,219	205,486	388,465	880,499	1,091	8367,728	1998,597
	8/4/22 11:00	11:00	104,154	93,121	4160,890	69,793	8,662	531,546	348,328	3469,954	10,134	206,363	377,967	884,390	0,925	8395,359	2005,197
	8/4/22 12:00	12:00	104,493	93,964	4160,890	70,058	8,690	531,053	349,642	3468,441	10,161	206,556	378,375	885,268	0,684	8400,044	2006,316
	8/4/22 13:00	13:00	105,648	94,171	4160,890	70,126	8,739	530,522	352,578	3466,615	10,218	207,347	383,774	888,833	0,726	8340,351	1992,059
	8/4/22 14:00	14:00	105,751	94,880	4160,890	69,459	8,730	530,928	352,796	3467,709	10,216	210,111	381,969	901,247	1,030	8313,351	1985,610
	8/4/22 15:00	15:00	106,390	94,899	4160,890	70,511	8,757	530,248	353,389	3465,742	10,230	208,791	392,001	895,318	0,867	8213,039	1961,651
	8/4/22 16:00	16:00	105,401	94,120	4160,890	70,318	8,701	530,212	351,748	3466,251	10,177	207,655	389,159	890,199	0,901	8280,909	1977,861
	8/4/22 17:00	17:00	104,749	94,001	4160,890	70,127	8,690	529,384	350,886	3464,328	10,145	208,324	384,661	893,188	0,853	8324,721	1988,326
	8/4/22 18:00	18:00	103,763	92,248	4160,890	70,555	8,628	528,704	347,415	3463,310	10,083	206,151	395,453	883,418	0,973	8228,855	1965,428
	8/4/22 19:00	19:00	104,462	93,215	4160,890	72,823	8,637	535,949	347,196	3481,067	10,023	203,665	384,858	872,275	0,877	8356,273	1995,862
	8/4/22 20:00	20:00	105,946	94,716	4160,890	72,392	8,756	532,999	353,493	3472,547	10,237	203,810	393,859	873,012	0,654	8340,849	1992,177
	8/4/22 21:00	21:00	105,613	94,551	4160,890	70,891	8,689	531,600	351,138	3469,797	10,159	201,791	384,747	863,973	0,709	8388,774	2003,624
	8/4/22 22:00	22:00	96,819	86,136	4160,890	64,690	8,092	537,309	321,389	3490,067	9,433	197,960	347,108	846,602	0,702	8550,060	2042,147
8/4/22 23:00	23:00	96,609	85,468	4160,890	65,725	8,128	533,598	321,789	3480,630	9,446	197,950	351,846	846,566	0,785	8510,313	2037,653	
AVERAGE															8386,089	2002,983	



Setelah *Overhaul* Bulan Desember 2022

PUNAGAYA #1																		
TANGGAL	JAM	LOAD		KALOR BB	FLOW BB	MAIN STEAM				FEED WATER				HEAT RATE (DATA)				
		GROSS	NETTO	kcal/kg	t/h	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	%	kJ/kWh	kcal/kWh		
02-Dec-23	12/2/23 10:00	10:00	106,965	96,221	4160,890	69,589	8,819	532,122	358,315	3469,705	10,320	214,844	387,841	922,637	1,997	8277,549	1977,059	
	12/2/23 11:00	11:00	107,898	97,048	4160,890	68,237	8,842	531,682	360,584	3468,366	10,373	213,761	390,789	917,761	1,970	8266,921	1974,520	
	12/2/23 12:00	12:00	107,079	48,580	4160,890	68,739	8,826	530,483	359,210	3465,577	10,337	217,152	390,837	933,096	2,033	8219,898	1963,289	
	12/2/23 13:00	13:00	106,651	96,685	4160,890	67,836	8,824	530,029	359,518	3464,481	10,352	217,180	394,222	933,231	1,958	8229,078	1965,482	
	12/2/23 14:00	14:00	108,413	98,075	4160,890	68,827	8,870	532,579	362,133	3470,288	10,447	217,029	389,706	932,577	2,043	8239,521	1967,976	
	12/2/23 15:00	15:00	107,573	97,311	4160,890	68,141	8,835	531,145	359,065	3467,120	10,331	217,710	391,671	935,626	2,025	8166,221	1950,468	
	12/2/23 16:00	16:00	107,265	96,771	4160,890	68,315	8,848	530,782	360,073	3466,087	10,393	217,077	391,430	932,775	1,939	8231,252	1966,001	
	12/2/23 17:00	17:00	105,909	94,860	4160,890	67,542	8,699	533,845	354,684	3475,205	10,237	215,115	384,604	923,834	2,035	8283,424	1978,462	
	12/2/23 18:00	18:00	106,262	95,939	4160,890	67,546	8,780	532,906	356,799	3472,057	10,302	213,824	388,017	918,019	2,070	8306,052	1983,866	
	12/2/23 19:00	19:00	107,553	96,408	4160,890	68,107	8,854	531,839	360,422	3468,625	10,388	214,197	394,936	919,735	1,836	8246,488	1969,640	
	12/2/23 20:00	20:00	107,295	95,604	4160,890	68,178	8,822	531,526	358,360	3468,202	10,376	212,471	391,948	911,938	2,064	8252,363	1971,043	
	12/2/23 21:00	21:00	106,888	96,083	4160,890	67,908	8,831	530,679	359,732	3466,017	10,355	211,674	389,051	908,337	2,058	8358,691	1996,439	
	12/2/23 22:00	22:00	106,214	95,578	4160,890	68,624	8,786	529,941	356,686	3464,671	10,307	211,692	396,567	908,400	2,117	8243,367	1968,894	
12/2/23 23:00	23:00	106,070	94,905	4160,890	68,126	8,750	529,521	355,658	3464,013	10,279	211,621	394,966	908,068	2,118	8233,647	1966,573		
AVERAGE															8269,044	1975,027		



Operasi Terkini Bulan Februari 2023

PUNAGAYA #1																	
TANGGAL	JAM	LOAD		KALOR	FLOW	MAIN STEAM				FEED WATER				HEAT RATE (DATA)			
		GROSS	NETTO	kcal/kg	t/h	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	P (MPa)	T (°C)	G (Ton/h)	h (kJ/kg)	%	kJ/kWh	kcal/kWh	
01-Feb-22	2/1/22 9:00	09:00	111,328	99,725	4160,890	78,655	8,591	532,624	381,103	3473,359	10,230	210,212	411,269	901,706	4,656	8559,052	2044,295
	2/1/22 10:00	10:00	110,263	98,898	4160,890	77,850	8,484	541,591	376,115	3496,494	10,134	208,759	422,434	895,138	4,676	8437,372	2029,562
	2/1/22 11:00	11:00	110,030	98,697	4160,890	78,183	8,460	541,333	374,643	3496,108	10,066	213,063	415,204	914,496	4,707	8453,028	2018,971
	2/1/22 12:00	12:00	111,448	99,823	4160,890	77,021	8,600	535,137	382,300	3479,450	10,223	214,167	415,492	919,540	4,567	8507,391	2031,955
	2/1/22 13:00	13:00	110,660	99,407	4160,890	76,637	8,511	534,691	378,453	3479,299	10,145	214,167	410,107	913,513	4,669	8481,334	2028,120
	2/1/22 14:00	14:00	111,138	99,755	4160,890	77,018	8,558	532,591	380,469	3473,629	10,187	215,421	408,882	925,200	4,708	8487,757	2027,266
	2/1/22 15:00	15:00	110,452	98,749	4160,890	76,356	8,525	526,130	380,412	3458,050	10,151	217,661	414,527	935,345	4,731	8399,636	2006,219
	2/1/22 16:00	16:00	110,688	99,829	4160,890	77,332	8,587	531,556	379,266	3470,776	10,252	215,972	407,094	927,718	4,910	8480,408	2025,511
	2/1/22 17:00	17:00	110,409	99,268	4160,890	77,389	8,612	531,081	378,860	3463,337	10,253	215,319	410,240	924,764	4,680	8468,665	2022,706
	2/1/22 18:00	18:00	111,144	100,054	4160,890	78,414	8,649	531,850	380,237	3470,833	10,269	212,449	415,965	911,799	4,714	8461,672	2021,036
	2/1/22 19:00	19:00	111,102	99,317	4160,890	79,489	8,600	531,166	379,266	3463,676	10,264	213,401	411,499	916,095	4,826	8451,311	2018,561
	2/1/22 20:00	20:00	111,657	100,301	4160,890	78,950	8,635	532,912	380,388	3473,604	10,298	213,601	411,992	917,008	4,845	8450,112	2018,275
	2/1/22 21:00	21:00	110,651	99,032	4160,890	78,950	8,615	531,011	378,344	3463,140	10,257	211,737	417,543	908,585	4,537	8452,138	2018,759
	2/1/22 22:00	22:00	111,381	100,285	4160,890	79,184	8,616	534,304	379,433	3477,226	10,270	212,535	414,151	912,189	4,672	8453,783	2019,151
2/1/22 23:00	23:00	109,971	98,793	4160,890	75,958	8,573	531,550	376,402	3470,909	10,223	210,760	414,069	904,172	4,759	8475,603	2024,363	
AVERAGE																8520,327	2035,045



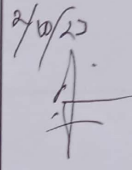

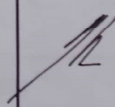
LEMBAR REVISI JUDUL SKRIPSI


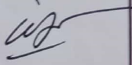

Nama Mahasiswa

: Ainun Zakina

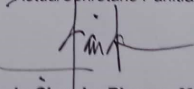
44219001

Catatan Daftar Revisi Penguji :

No.	N a m a	Uraian	Tanda Tangan
1	Ir. Chandra Bhuana, M.T.	- η dan Heat Rate dibuat dalam bentuk $\%$ kesimpulan.	2/10/20 
2	Dr. Ir. Firman, M.T.	-	
3	Musrady Mulyadi, S.ST., M.T.	-	

No.	Nama	Uraian	Tanda Tangan
4	Dr. Jamal, S.T., M.T.	- flow chart (Valid).	
5	Prof. Ir. Muhammad Anshar, M.Si., Ph.D.	-	
6	Abdul Rahman, S.T., M.T.	-	

Makassar, 24 September 2023
Ketua/Sekretaris Panitia Ujian Skripsi,



Ir. Chandra Bhuana, M.T.
NIP

Catatan: Jika ada perubahan Judul Skripsi, konfirmasi secepatnya ke bagian Akademik