

**PENGARUH *AIR HEATER* TERHADAP PENINGKATAN
EFISIENSI *BOILER* PADA UNIT 3 PLTU PT. PLN (PERSERO)
UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN BELAWAN**

SKRIPSI

OLEH :

ANDREAS SINAGA

NPM : 158130020



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
2019**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 10/25/19

Access From (repository.uma.ac.id)

**PENGARUH AIR HEATER TERHADAP PENINGKATAN
EFISIENSI BOILER PADA UNIT 3 PLTU PT. PLN (PERSERO)
UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN BELAWAN**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh
Gelar Strata Satu (S1) Pada Jurusan Teknik Mesin*

Fakultas Teknik

Universitas Medan Area

OLEH :

ANDREAS SINAGA

NPM : 158130020



PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MEDAN AREA

MEDAN

2019

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 10/25/19

Access From (repository.uma.ac.id)

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : Pengaruh *Air Heater* Terhadap peningkatan Efisiensi *Boiler* pada Unit 3 PLTU PT. PLN (PERSERO) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan

Nama : Andreas Sinaga

Npm : 158130020

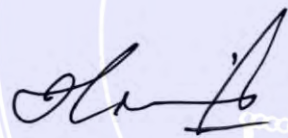
Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S1

Disetujui Oleh

Komisi Pembimbing



Ir. Husin Ibrahim, MT
Pembimbing I




Muhammad Idris, ST, MT
Pembimbing II

Mengetahui:



Dr. Faisal Amri Tanjung, S.ST, MT
Dekan Fakultas Teknik



Bobby Umroh, ST, MT
Ketua Program Studi

Tanggal Lulus: 20 September 2019

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Andreas Sinaga

NPM : 158130020

Tempat Tanggal Lahir : Makmur, 05 Juli 1997

Dengan ini menyatakan bahwa Skripsi dengan judul : “Pengaruh *Air Heater* Terhadap Peningkatan Efisiensi *Boiler* pada Unit 3 PLTU PT. PLN (PERSERO) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan” adalah hasil pekerjaan saya dan seluruh ide, pendapat, atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan, maka saya bersedia menanggung sanksi yang akan dikenakan kepada saya termasuk pencabutan gelar Sarjana Teknik yang nanti saya dapatkan.

Medan, 20 September 2019



Andreas Sinaga

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : ANDREAS SINAGA
NPM : 158130020
Program Studi : MESIN
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Eksklusif (Non-exclusive Royalty-free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul: Pengaruh *Air Heater* Terhadap Peningkatan Efisiensi *Boiler* Pada Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas Royalty Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis sayaselama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai hak pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Medan, 20 September 2019

Yang menyatakan



Andreas Sinaga

ABSTRAK

Andreas Sinaga. Pengaruh *Air Heater* Terhadap Peningkatan Efisiensi *Boiler* Pada Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan. Dibimbing oleh Ir. Husin Ibrahim, MT. dan Muhammad Idris, ST. MT.

Energi listrik memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia untuk memudahkan segala pekerjaan. Peningkatan jumlah penduduk membuat kebutuhan energi listrik juga mengalami peningkatan. Berdasarkan data yang diperoleh dari Outlook Energi Indonesia tahun 2018, kapasitas pembangkit listrik nasional (PLN dan non PLN) pada tahun 2016 mencapai 57,1 GW, dengan pangsa terbesar PLTU sebesar 54% (30,8 GW). PLTU sebagai pangsa terbesar penyuplai listrik saat ini membuat pentingnya untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit tersebut. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam peningkatan efisiensi *boiler* ini adalah dengan menambahkan suatu alat pemanas udara (*air heater*) pada saluran pembuangan gas buang (*flue gas boiler*). Seperti yang kita ketahui proses terjadinya pembakaran ada tiga hal penyebabnya, yaitu udara, temperatur, dan bahan bakar. Supaya proses pembakaran itu lebih cepat maka udara yang dibutuhkan itu terlebih dahulu dipanaskan di pemanas udara (*air heater*) sehingga bahan bakar yang dibutuhkan untuk pembakaran berkurang. Dengan adanya alat pemanas udara (*air heater*) ini pada *boiler* akan memberi penghematan pemakaian bahan bakar dan juga membantu kerja boiler dalam memanaskan air untuk menghasilkan uap, dan hal ini juga diharapkan untuk mencapai proses pembakaran yang sempurna di ruang bakar. Penelitian ini dilaksanakan di Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan. Penelitian ini bertujuan untuk : (1) untuk menganalisis bahan bakar pada *Boiler* di Unit 3 PLTU Belawan, (2) Untuk menghitung peningkatan efisiensi pada *Boiler* dengan adanya alat pemanas udara (*Air heater*) di Unit 3 PLTU Belawan. Dari hasil analisis yang diperoleh dengan menggunakan *air heater* diperoleh kenaikan efisiensi *boiler* sebesar 0.67% pada awalnya efisiensinya 77.56% setelah menggunakan *air heater* efisiensinya menjadi 78.23%.

Kata Kunci: Alat Pemanas Udara (*Air Heater*), Peningkatan efisiensi, Ketel uap

ABSTRACT

Andreas Sinaga. 158130020. "The Effect of Air Heater on the Boiler Efficiency Improvement at Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Generating Unit Belawan". Supervised by Ir. Husin Ibrahim, M.T., and Muhammad Idris, S.T., M.T.

Electrical energy has a vital role in human lives to ease all works. The increasing of the total population makes electrical energy needs also increase. Based on the obtained data of Outlook Energy of Indonesia in 2018, the capacity of national power plants (PLN and non-PLN) in 2016 have reached 57.1 GW, with PLTU (steam power plant) as the largest segment of 54% (30.8 GW). PLTU as the largest segment in supplying the electricity currently concerns to improve the efficiency of the power plant. One of the ways in increasing the boiler efficiency is by adding a tool of air heater on the waste channel of boiler flue gas. Furthermore, there are three main causes in the combustion process, namely air, temperature, and fuel. Then, to make the combustion process faster, it needs to heat the air in the air heater first so the fuel needed in the combustion can be reduced. By utilizing the air heater in the boiler, it will save the fuel used and help the boiler work in heating the water to produce the steam, also it is hoped to reach the perfect combustion process in the combustion room. The study was conducted at Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Generating Unit Belawan. The study aimed to: (1) to analyze fuel on the boiler at Unit 3 PLTU Belawan, (2) to calculate the efficiency improvement on the boiler with the air heater at Unit 3 PLTU Belawan. Thus, the analysis result showed that there was a boiler efficiency improvement of 0.67% with the beginning efficiency of 77.5%; it became 78.23% after utilizing the air heater.

Keywords: Air Heater, Efficiency improvement, Steam boiler



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Pengaruh *Air Heater* Terhadap Peningkatan Efisiensi *boiler* unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan dengan sebaik baiknya. Tujuan dari penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Strat-1 Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran guna kesempurnaan skripsi ini. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis dapat menyelesaikannya karena adanya bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak yang terlibat langsung maupun tidak langsung dalam meluangkan waktu dan pikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan., M.Eng. MSc, selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Dr. Faisal Amri Tanjung, S.ST. MT., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Medan Area.
3. Bapak Bobby Umroh, ST. MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area.
4. Bapak Ir. Husin Ibrahim, MT., Selaku Pembimbing I.
5. Bapak Muhammad Idris, ST. MT., selaku Pembimbing II.

6. Seluruh dosen program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Medan Area yang telah memberikan pengetahuannya ketika mengajar mata kuliah dengan ikhlas kepada penulis.
7. Seluruh staf dosen pengajar dan karyawan/wati di Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
8. Bapak Syahminan Siregar, selaku Manager PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan.
9. Bapak Juni Perangin-angin, selaku Supervisor Pemeliharaan Boiler PLTU.
10. Kedua Orang Tua yang tidak henti memberikan kasih yang begitu tulus melalui doa, keringat, dan restu yang menjadi motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
11. Teman-teman Satu Kos Tercinta di jalan Toba Nauli No. 13 yang telah memberikan dukungan sepenuh hati sehingga penulis mempunyai semangat untuk menyelesaikan Skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga apa yang telah disajikan dalam skripsi ini dapat bermanfaat dan digunakan sebagai bahan referensi untuk rekan-rekan dan pembaca sekalian. Penulis berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa dapat membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan pada penulis.

Medan, 20 September 2019

Andreas Sinaga

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

ABSTRAKError! Bookmark not defined.

KATA PENGANTAR..... iii

DAFTAR ISI.....v

DAFTAR GAMBAR..... vii

DAFTAR TABEL viii

DAFTAR NOTASI..... ix

BAB I PENDAHULUAN.....Error! Bookmark not defined.

1.1. Latar BelakangError! Bookmark not defined.

1.2. Rumusan MasalahError! Bookmark not defined.

1.3. Tujuan Penelitian.....Error! Bookmark not defined.

1.4. Manfaat Penelitian.....Error! Bookmark not defined.

1.5. Batasan Masalah.....Error! Bookmark not defined.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....Error! Bookmark not defined.

2.1. Tinjauan Umum *Boiler*.....Error! Bookmark not defined.

2.2. Klasifikasi *Boiler*.....Error! Bookmark not defined.

2.2.1. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipaError! Bookmark not defined.

2.2.2. Berdasarkan pemakaiannya.....Error! Bookmark not defined.

2.2.3. Berdasarkan pada poros tutup drum..Error! Bookmark not defined.

2.2.4. Berdasarkan be ntuk dan letak pipa .Error! Bookmark not defined.

2.2.5. Berdasarkan tekanan kerjanya.....Error! Bookmark not defined.

2.2.6. Berdasarkan kapasitasnyaError! Bookmark not defined.

2.2.7. Berdasarkan pada sumber panasnya.Error! Bookmark not defined.

2.3. Komponen-komponen *Boiler*Error! Bookmark not defined.

2.3.1. Komponen utamaError! Bookmark not defined.

2.3.2. Komponen pendukungError! Bookmark not defined.

2.4. Siklus Rankine.....Error! Bookmark not defined.

2.5. Jenis-jenis Pemanas UdaraError! Bookmark not defined.

2.6. Aliran Gas Buang dan Udara.....Error! Bookmark not defined.

2.7. Prinsip Kerja Pemanas Udara.....Error! Bookmark not defined.

2.7.1. Komponen *Air heater*.....Error! Bookmark not defined.

2.8. Proses Perpindahan PanasError! Bookmark not defined.

2.9.	Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
2.9.1.	Nilai Kalor Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
2.9.2.	Kebutuhan Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
2.10.	Udara Pembakaran Ruang Bakar	Error! Bookmark not defined.
2.11.	Efisiensi <i>Boiler</i>	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		Error! Bookmark not defined.
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.1.1.	Tempat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2.	Waktu Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.2.	Alat dan Bahan	Error! Bookmark not defined.
3.2.1.	Alat.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.2.	Bahan.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.	Analisis Data	Error! Bookmark not defined.
3.4.	Metode Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV ANALISA DATA.....		Error! Bookmark not defined.
4.1.	Hasil Data	Error! Bookmark not defined.
4.1.1.	Data Pengamatan Operasi <i>Boiler</i>	Error! Bookmark not defined.
4.2.	Analisis data	Error! Bookmark not defined.
4.2.1.	Nilai Kalor Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
4.2.2.	Kebutuhan Bahan Bakar	Error! Bookmark not defined.
4.2.3.	Kebutuhan udara pembakaran pada ruang bakar	Error! Bookmark not defined.
4.2.4.	Kesetimbangan Panas.....	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		Error! Bookmark not defined.
5.1.	Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
5.2.	Saran	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		Error! Bookmark not defined.
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ketel Uap.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.2 Ketel Pipa Api.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.3 Ketel Pipa Air.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.4 Ketel Tegak.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.5 Ketel Mendatar.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.6 Ruang Bakar.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.7 Burner.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.8 Low Temperature Superheater.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.9 High Temperature Superheater.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.10 <i>Economizer</i>	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.11 Boiler Drum.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.12 Cerobong.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.13 Force Drought Fan (FDF).....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.14 Air Preheater.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.15 <i>Air heater</i>	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.16 Bagan sederhana siklus Rankine.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.17 Diagram T-s siklus Rankine.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.18 <i>Air heater</i> rekuperatif.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.19 <i>Air heater</i> regenerative.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.20 Skema Terjadinya Pembakaran.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.21 Aliran Uap, Air, Udara, dan Flue Gas.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.22 <i>Air heater</i>	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.23 Diagram neraca energi.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3.1 Wilayah Pembangkit UPK Belawan..	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.1. Grafik Kapasitas Boiler.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.2. Grafik Temperatur Uap Masuk HTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.3. Grafik Temperatur Uap Keluar HTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.4. Grafik Tekanan Uap Keluar HTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.5. Grafik Temperatur Uap Masuk LTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.6. Grafik Temperatur Uap Keluar LTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.7. Grafik Temperatur Air Masuk Economizer.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.8. Grafik Temperatur Air Keluar Economizer.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.9. Grafik Kapasitas Air Masuk Economizer.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.10. Grafik Temperatur Flue Gas Masuk Air heater.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.11. Grafik Temperatur Flue Gas Keluar Air heater.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.12. Grafik Temperatur Udara Masuk Air heater.....	Error! Bookmark not defined.

Gambar 4.13. Grafik Temperatur Udara Keluar Air heater **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.14. Grafik Temperatur Uap Saturasi **Error! Bookmark not defined.**

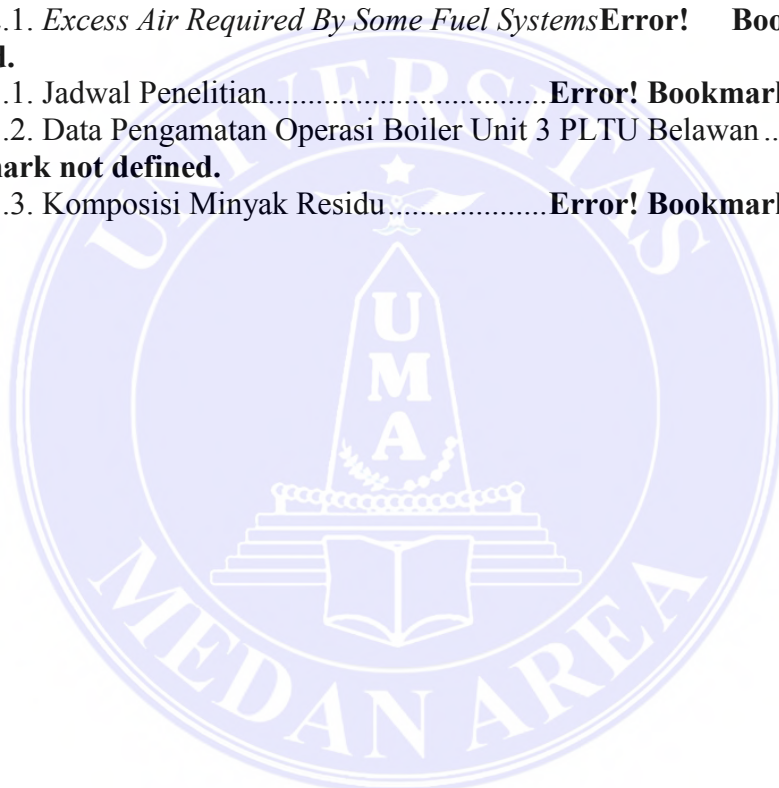
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. *Excess Air Required By Some Fuel Systems* **Error! Bookmark not defined.**


Tabel 3.1. Jadwal Penelitian..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.2. Data Pengamatan Operasi Boiler Unit 3 PLTU Belawan **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.3. Komposisi Minyak Residu..... **Error! Bookmark not defined.**



DAFTAR NOTASI



Q	: Energi Panas	(kkal/jam)
T	: Temperatur	(°C)
LHV	: <i>Low Heating Value</i>	(kJ/kg)
HHV	: <i>High Heating Value</i>	(kJ/kg)
h	: Entalpi	(kJ/kg)
\dot{m}_s	: Kapasitas Uap	(kg/jam)
\dot{m}_f	: Kapasitas Bahan Bakar	(kg/jam)
$(W_a)_{th}$: Berat Udara Teoritis	(kg _{udara} /kg _{b.bakar})
$(W_a)_{act}$: Berat Udara Aktual	(kg _{udara} /kg _{b.bakar})

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia untuk memudahkan segala pekerjaan [1]. Berdasarkan laporan Bappenas dalam Proyeksi Penduduk Indonesia 2010-2035 jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2020 akan mencapai 271 juta jiwa, atau bertambah 10 juta dari jumlah penduduk pada tahun 2017. Meningkatnya jumlah penduduk membuat kebutuhan energi listrik juga mengalami peningkatan. Peningkatan kebutuhan listrik menjadikan kebutuhan listrik per kapita mencapai 4.902 kWh pada tahun 2050, naik hampir 6 kali lipat dibanding 2016 (846 kWh/kapita) [2].

Berdasarkan data yang diperoleh dari Outlook Energi Indonesia tahun 2018, kapasitas pembangkit listrik nasional (PLN dan non PLN) pada tahun 2016 mencapai 57,1 GW, dengan pangsa terbesar PLTU sebesar 54% (30,8 GW). Adapun kapasitas pembangkit berbasis EBT, seperti PLTM, PLTA, PLTP, PLTS, dan PLTB adalah sebesar 6,9 GW atau sekitar 12%. Sisanya merupakan pembangkit berbahan bakar gas dan BBM. PLTU sebagai pangsa terbesar penyuplai listrik saat ini membuat pentingnya untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit itu sendiri [2].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Dalam proses produksi listrik PLTU, peralatan utamanya adalah *Boiler*, turbin, generator, tranformator dan alat-alat bantu (*auxiliary*). *Boiler* adalah bejana tertutup dimana

panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk uap. Komponen penting pada *Boiler* adalah *burner*, ruang bakar, penukar panas dan sistem kontrol. Didalam *Boiler* terjadi proses pembakaran dan pembakaran itu sendiri menghasilkan gas buang (*flue gas*) [3].

Pemanfaatan energi panas yang terkandung pada gas buang (*flue gas*) yang dulunya kurang dioptimalkan ternyata mempunyai peran yang sangat penting dalam peningkatan efisiensi *Boiler* [4]. Pada abad ke-20 ini pemanfaatan energi gas buang itu telah dikembangkan, khususnya para ahli bidang perekayasa energi. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam peningkatan efisiensi *Boiler* ini adalah dengan menambahkan suatu alat Pemanas Udara (*Air heater*) pada saluran pembuangan gas buang (*flue gas*) *Boiler* [1].

Pemanas udara (*Air heater*) ini merupakan alat yang memanaskan udara sebelum masuk ke ruang bakar. Udara sebelum masuk ke ruang bakar temperaturnya adalah temperatur lingkungan. Seperti yang kita ketahui proses terjadinya pembakaran ada tiga hal penyebabnya, yaitu udara, panas, dan bahan bakar. Supaya proses pembakaran itu lebih cepat maka udara yang dibutuhkan itu terlebih dahulu dipanaskan di pemanas udara (*Air heater*) sehingga bahan bakar yang dibutuhkan untuk pembakaran berkurang [1].

Berdasarkan permasalahan diatas, penulis mencoba melakukan penelitian pada “Pengaruh *air heater* terhadap peningkatan efisiensi *boiler* unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan”.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan antara lain:

1. Bagaimana hasil analisis bahan bakar pada *Boiler*?
2. Bagaimana peningkatan efisiensi pada *Boiler* dengan adanya alat pemanas udara (*Air heater*)?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian alat pemanas udara (*Air heater*) ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis bahan bakar pada *Boiler*.
2. Untuk menghitung peningkatan efisiensi pada *Boiler* dengan adanya alat pemanas udara (*Air heater*).

1.4. Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat dari penelitian ini adalah:

A. Bagi Mahasiswa

1. Untuk meningkatkan pengetahuan, dan wawasan penulis tentang alat pemanas udara (*air heater*).
2. Sebagai bahan acuan untuk penelitian berikutnya, yang sama dengan penelitian ini.

B. Bagi Fakultas

1. Memperkenalkan Departemen Teknik Mesin secara luas sebagai forum ilmu terapan yang bermanfaat bagi perusahaan.

2. Mempererat hubungan kerjasama dengan perusahaan.

C. Bagi Perusahaan

1. Bahan perbandingan serta sumbangan pemikiran dalam menganalisis efisiensi *boiler* PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan, sehingga perusahaan dapat mengetahui seberapa besar pengaruh *air heater* sebagai komponen pendukung terhadap peningkatan efisiensi *boiler*.
2. Perusahaan dapat menjadikan hasil penelitian ini sebagai informasi mengenai kondisi alat pemanas udara (*air heater*) yang digunakan.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

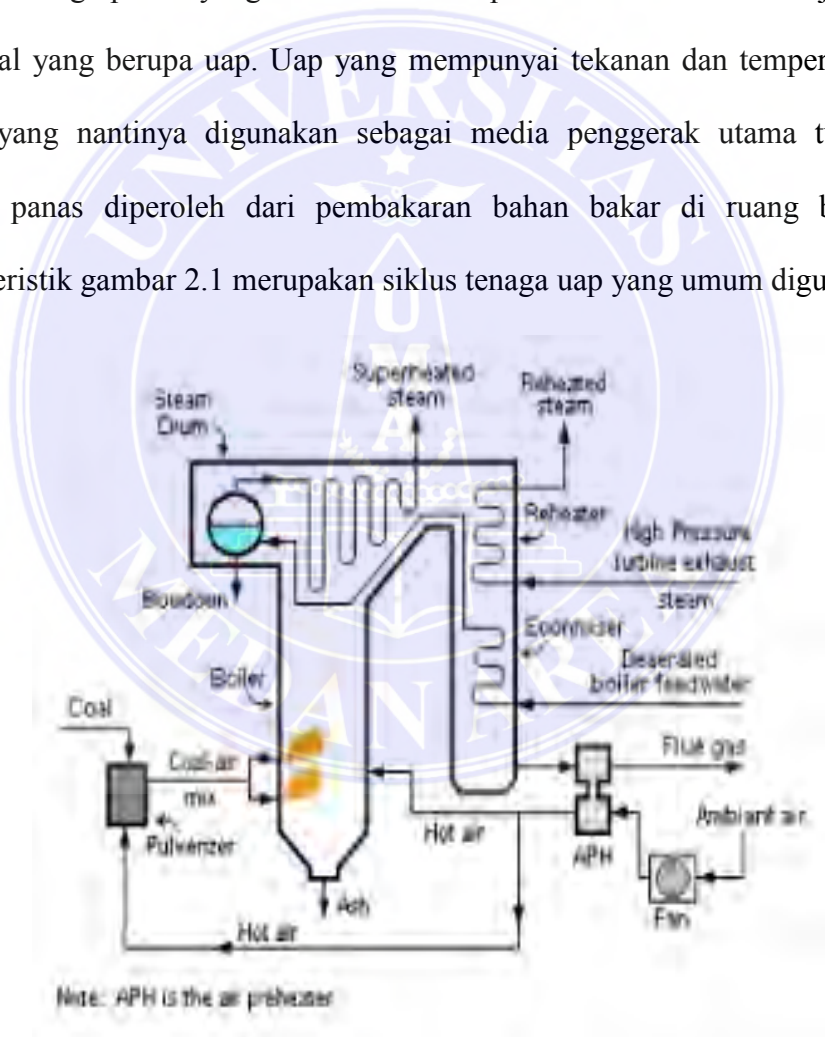
1. Penelitian dilakukan di sistem pembangkit tenaga uap (SPTU)
2. Prinsip kerja pemanas udara (*Air heater*).
3. Temperatur gas buang (*flue gas*) masuk dan keluar pemanas air dan pemanas udara (*Air heater*).
4. Temperatur udara yang masuk dan keluar pemanas udara (*Air heater*).
5. Menganalisis panas yang dihasilkan ruang bakar.
6. Efisiensi *Boiler* sebelum dan sesudah memakai alat pemanas udara.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum Boiler

Komponen utama di dalam sistem pembangkit tenaga uap adalah *Boiler* atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama turbin uap. Energi panas diperoleh dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar [10] Karakteristik gambar 2.1 merupakan siklus tenaga uap yang umum digunakan.



Gambar 2.1 Ketel Uap

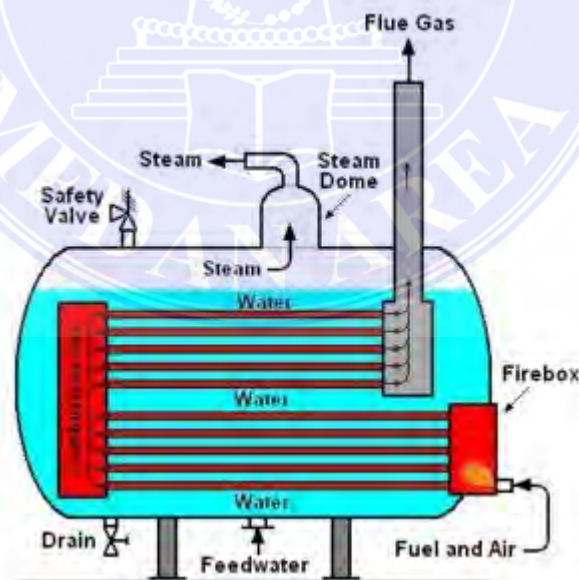
2.2. Klasifikasi *Boiler*

Berikut adalah beberapa macam klasifikasi *Boiler*: [9]

2.2.1. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa

a. Ketel pipa api (*fire tube Boiler*)

Ketel pipa api seperti tampak pada gambar 2.2, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan ketel ada didalam shell untuk dirubah menjadi steam. Ketel pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah dan sedang. Sebagai pedoman, ketel pipa api kompetitif untuk kecepatan steam sampai 14.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². Ketel pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam 6 operasi. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar ketel pipa api dikonstruksi sebagai *Boiler* (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.

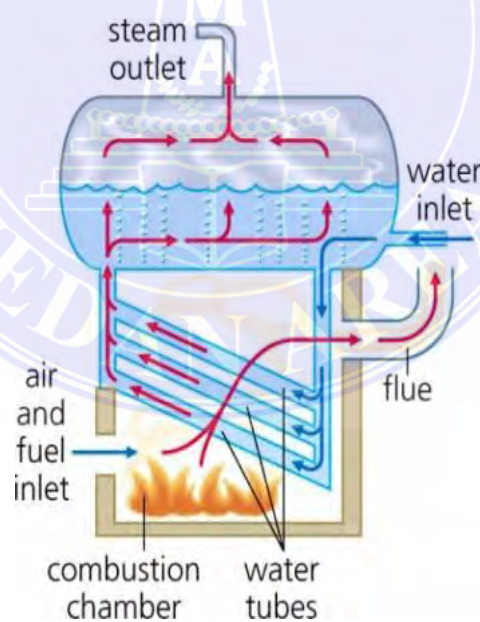


Gambar 2.2 Ketel Pipa Api

b. Ketel pipa air (*water tube Boiler*)

Ketel pipa air seperti tampak pada gambar 2.3, air umpan *Boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Untuk ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel pipa air sebagai berikut:

1. *Force, induce* dan *balance draft* membantu untuk meningkatkan efisiensi.
2. Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari pengolahan air.
3. Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.



Gambar 2.3 Ketel Pipa Air

2.2.2. Berdasarkan pemakaiannya

a. Ketel Stasioner (*Stasionary Boiler*) atau ketel tetap

Merupakan ketel-ketel yang didudukkan di atas fundasi yang tetap, seperti ketel untuk pembangkit tenaga, untuk industri dan lain-lain sebagainya.

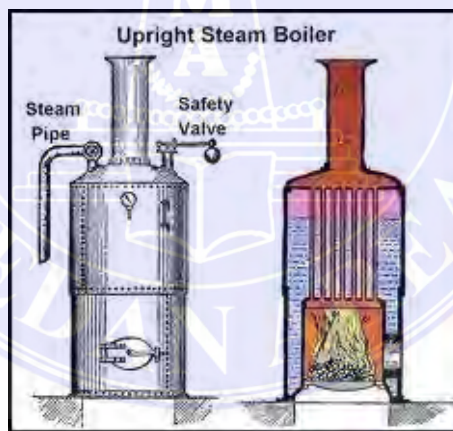
b. Ketel pindah atau portable *Boiler*.

Merupakan ketel yang dipasang fundasi yang berpindah-pindah (mobil), seperti *Boiler* lokomotif, lokomobil, dan ketel panjang serta lain yang sebagainya termasuk ketel kapal (*marine Boiler*).

2.2.3. Berdasarkan pada poros tutup drum

a. Ketel Tegak

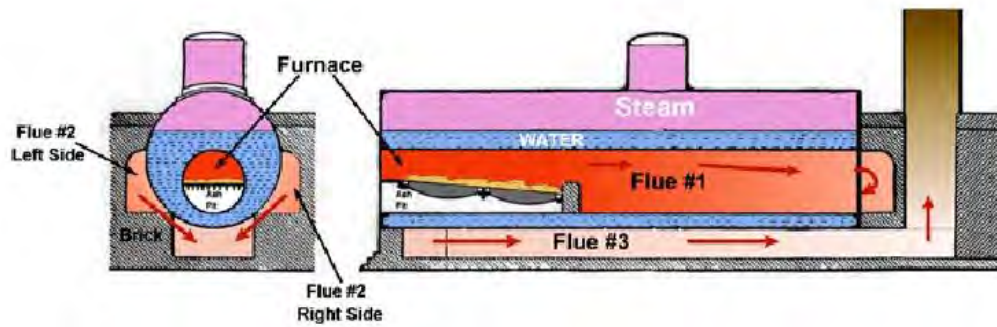
Ketel Tegak seperti tampak pada gambar 2.4 (*vertical steam Boiler*), adapun contoh ketel tegak adalah ketel Cocharn, Ketel Clarkson dan lain-lainnya.



Gambar 2.4 Ketel Tegak

b. Ketel mendatar

Adapun yang termasuk jenis ketel ini adalah ketel Cornish, Lancashire (tampak pada gambar 2.5) , Scotch dan lain-lain.



Gambar 2.5 Ketel Mendatar

2.2.4. Berdasarkan bentuk dan letak pipa

- a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan terlekak-lekuk (straight, bent and sinuous tubuler heating surface).
- b. Ketel dengan pipa miring datar dan miring tegak (horizontal, inclined or vertical tubuler heating surface).

2.2.5. Berdasarkan tekanan kerjanya

- a. Ketel peredaran alami (natural circulation steam Boiler).

Merupakan *Boiler* dengan peredaran air didalam ketel terjadi secara alami yaitu air yang ringan naik, sedangkan air yang berat turun, sehingga terjadi aliran konveksi alami. Umumnya ketel beroperasi secara aliran alami, seperti ketel *Lancashire*, *Babcock & Wilcox* dan lain-lain.

- b. Ketel peredaran paksa (*force circulation steam Boiler*)

Merupakan *Boiler* dengan aliran paksa, aliran paksa diperoleh dari pompa sentrifugal yang digerakan secara elektrik motor, misalnya sistem aliran paksa pada ketel-ketel bertekanan tinggi misalnya *La-mont Boiler*, *Benson Boiler*, *Loeffler Boiler* dan *Velcan Boiler*.

2.2.6. Berdasarkan kapasitasnya

- a. Tekanan kerja rendah : ≤ 5 atm
- b. Tekanan kerja sedang : $> 5-40$ atm
- c. Tekanan kerja tinggi : $> 40-80$ atm
- d. Tekanan kerja sangat tinggi : > 80 atm

2.2.7. Berdasarkan pada sumber panasnya

- a. Ketel uap dengan bahan bakar alami.
- b. Ketel uap dengan bahan bakar buatan.
- c. Ketel uap dengan dapur listrik.
- d. Ketel uap dengan energi nuklir

2.3. **Komponen-komponen *Boiler***

Boiler terdiri dari beberapa komponen yang memiliki fungsi yang berbeda, yaitu : [9]

2.3.1. Komponen utama

- a. Ruang bakar

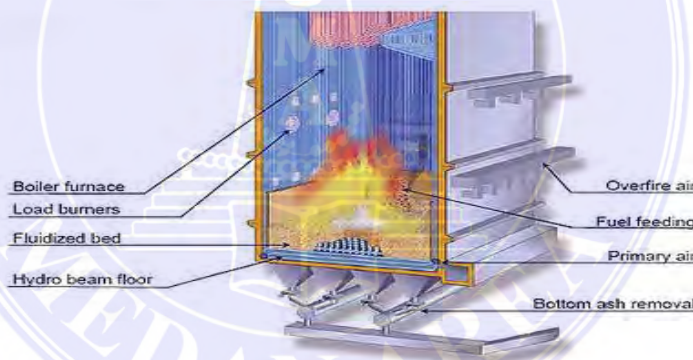
Ruang bakar seperti tampak pada gambar 2.6, adalah bagian dari *Boiler* yang berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar dan udara. Tekanan gas panas yang berada di dalam ruang bakar (*furnace*) dapat lebih besar dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar positif) dan dapat juga bertekanan lebih kecil daripada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar negatif) atau bertekanan seimbang (*balance draft*).



Gambar 2.6 Ruang Bakar

b. Penyala (*Burner*)

Burner seperti tampak pada gambar 2.7, adalah salah satu komponen dari *Boiler* yang menyediakan input panas dengan pembakaran bahan bakar fosil (solar, batubara, dll) termasuk gas alam, dengan hembusan udara atau oksigen. Bahan bakar dikabutkan melalui semprotan bertekanan melalui *nozzle*.



Gambar 2.7 *Burner*

c. *Superheater*

Superheater adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut sesuai dengan kebutuhan untuk menggerakkan *turbine*. Karena uap yang terbentuk dari pemanasan didalam pipa – pipa di ruang bakar berada dalam wujud jenuh atau basah maka uap yang demikian jika digunakan atau diekspansi dalam *turbine*, akan menimbulkan pengembunan yang cepat. *Superheater* dibedakan atas 2 jenis yaitu:

1. *Low Temperature Superheater (LTS)*

Uap jenuh dari *steam drum* dialirkan ke *primary Superheater* atau *low temperature Superheater*. *Low Temperature Superheater (LTS)* seperti pada gambar 2.8 menghasilkan uap dengan temperature 426 °C. Uap yang keluar dari *LTS* kemudian dialirkan ke *High Temperature Superheater* untuk dipanaskan kembali menjadi uap panas lanjut. Uap dari *LTS* juga digunakan untuk *steam atomizing* yang membantu proses pengabutan bahan bakar agar bahan bakar dapat terbakar sempurna. Besar energi panas yang diserap oleh *low temperature Superheater (LTS)* untuk mengubah air menjadi uap dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini;

$$Q_{LTS} = \dot{m}_s \times (h_{out} - h_{in}) \text{ kJ/jam} \dots\dots\dots(2.1)$$

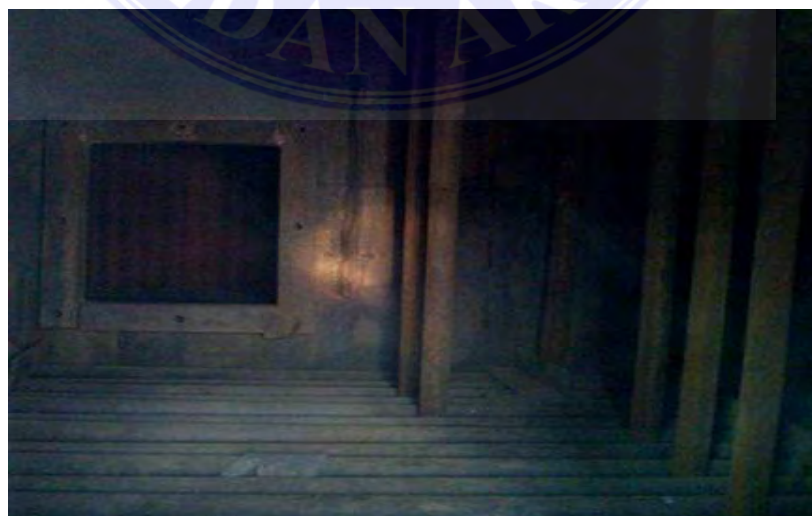
Dimana :

Q_{LTS} : Panas yang diserap oleh *low temperature Superheater* (kJ/jam)

\dot{m}_s : Kapasitas aliran uap (kg/jam)

h_{out} : Entalpi keluar *LTS* (kJ/kg)

h_{in} : Entalpi masuk *LTS* (kJ/kg)



Gambar 2.8 *Low Temperature Superheater*

2. High Temperature Superheater (HTS)

Uap hasil pemanasan *LTS* selanjutnya mengalir ke *High Temperature Superheater (HTS)* seperti pada gambar 2.9 yang terletak pada bagian gas sangat panas. Sebagian dari *HTS* terletak tepat diatas ruang bakar, oleh karena itu transfer panas yang diperoleh oleh *HTS* adalah secara radiasi dan konveksi. Kemudian uap panas yang diperoleh dari *HTS* adalah secara radiasi dan konveksi. Kemudian uap panas yang diperoleh dari *HTS* mengalir ke turbin. Besar panas yang diserap oleh *High Temperature Superheater* untuk menghasilkan uap dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Q_{HTS} = \dot{m}_s \times (h_{out} - h_{in}) \text{ kJ/jam} \dots\dots\dots(2.2)$$

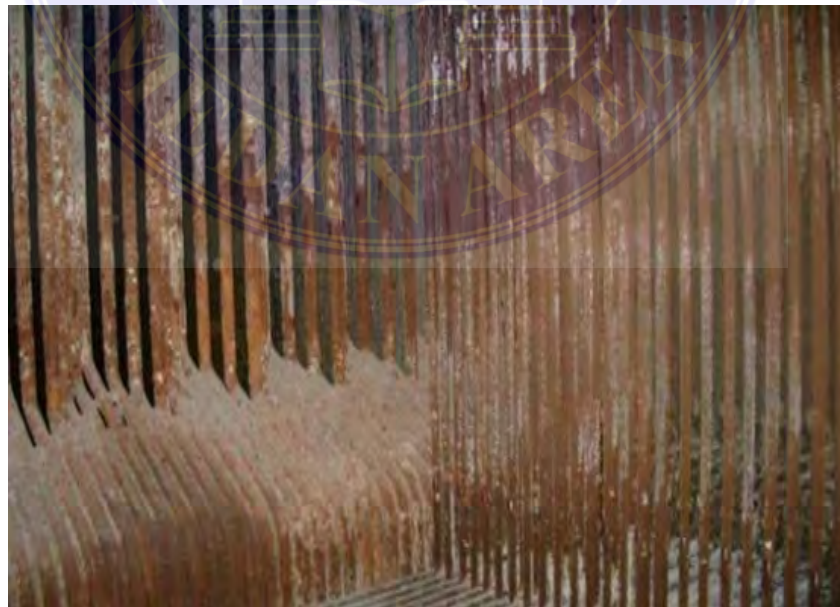
Dimana :

Q_{HTS} : Panas yang diserap oleh *high temperature Superheater* (kJ/jam)

\dot{m}_s : Kapasitas aliran uap (kg/jam)

h_{out} : Entalpi keluar *HTS* (kJ/kg)

h_{in} : Entalpi masuk *HTS* (kJ/kg)



Gambar 2.9 *High Temperature Superheater*

d. *Economizer*

Economizer seperti tampak pada gambar 2.10 merupakan salah satu peralatan yang meningkatkan efisiensi *Boiler* karena memanfaatkan kalor yang terkandung dalam *flue gas* sebelum terbuang ke atmosfer melalui *stack*. Dengan adanya *ekonomizer* maka unit PLTU telah menghemat konsumsi bahan bakar. *Economizer* terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap sebelum meninggalkan *Boiler*. Transfer panas yang terjadi pada *economizer* adalah secara konveksi.

Besar panas yang diserap oleh *economizer* ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{eco} = \dot{m}_s \times C_{p_{air}} (T_{out} - T_{in}) \text{ kJ/jam} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

Q_{eco} : Panas yang diserap oleh *economizer* (kJ/jam)

\dot{m}_s : Kapasitas aliran uap (kg/jam)

$C_{p_{air}}$: Panas jenis air (kJ/Kg°C)

T_{out} : Temperatur keluar *economizer* (°C)

T_{in} : Temperatur masuk *economizer* (°C)



Gambar 2.10 *Economizer*

e. *Boiler drum*

Boiler drum tampak seperti gambar 2.11 adalah bejana tempat menampung air yang datang dari *economizer* dan uap hasil penguapan dari *tubewall*. Kira – kira setengah dari drum berisi air dan setengahnya lagi berisi uap. *Boiler drum* terbuat dari plat baja dilas dan dilengkapi diantaranya:

1. *Man hole*
2. Saluran menuju *Superheater*
3. Saluran menuju *feedwater inlet*
4. Saluran menuju *blowdown*
5. Saluran menuju *downcomer*
6. Saluran menuju *safety valve*
7. Pipa injeksi bahan kimia
8. Pipa *sample taking*
9. Pipa menuju alat ukur dan kontrol

Pengaturan level di dalam *Boiler drum* dilakukan dengan mengatur besarnya pembukaan *flow control valve*. Apabila level air didalam drum terlalu rendah atau tidak terkontrol akan menyebabkan terjadinya *overheating* pada pipa – pipa *Boiler*, sedangkan bila level drum terlalu tinggi, kemungkinan butir – butir air terbawa ke turbin dan mengakibatkan kerusakan pada turbin. Untuk mengamankannya pada *Boiler drum* dipasang alarm untuk level *high* dan level *low* serta trip untuk level *very low* dan *very high*. Uap yang dihasilkan dari dalam *tube wall* terkumpul di dalam *Boiler drum*. Uap akan mengalir ke arah puncak *Boiler drum* melewati steam separator dan *screen dryer* lalu keluar dari dalam

drum menuju *Superheater* dan akhirnya ke turbin. Sedangkan butir – butir air yang jatuh akan bersirkulasi kembali bersama air yang baru masuk.



Gambar 2.11 Boiler Drum

f. Cerobong

Cerobong/*stack* seperti tampak pada gambar 2.12 merupakan cerobong asap yang berfungsi sebagai laluan flue gas terbang ke atmosfer. Temperatur flue gas sebelum terbang ke atmosfer dijagatidak melebihi 160°C , agar tidak terjadi kerusakan lingkungan atau merusak lapisan ozon.



Gambar 2.12 Cerobong

2.3.2. Komponen pendukung

a. *Forced Drought Fan (FDF)*

FDF seperti pada gambar 2.13 berfungsi untuk mengambil udara dari atmosfer dengan suhu sekitar 30°C dan tekanan 1 atm. Untuk kebutuhan *Fuel oil burner*, setiap FDF mampu melayani 60% dari keperluan beban.



Gambar 2.13 *Force Drought Fan (FDF)*

b. *Air preheater*

Air Preheater seperti pada gambar 2.14 merupakan alat pemanas awal udara pembakaran. Dimana udara yang dihisap oleh FDF dengan temperatur sekitar 30°C mengalir melalui *air preheater* dan dihasilkan temperatur udara sekitar 120°C . Media yang digunakan untuk memanaskan udara melalui *air preheater* adalah steam yang diperoleh dari *Auxillary Steam Header* dengan temperatur steam 180°C .



Gambar 2.14 *Air Preheater*

c. *Air heater*

Air heater seperti pada gambar 2.15 merupakan salah satu alat penukar kalor yang meningkatkan efisiensi ketel uap. Karena memanfaatkan kalor yang terkandung pada gas buang hasil pembakaran untuk memanaskan udara. Udara yang telah mengalami proses pemanasan di *air preheater* selanjutnya dialirkan melewati *Air heater* untuk dipanaskan kembali. Proses transfer panas yang terjadi di *Air heater* adalah secara konveksi. Temperatur udara setelah dipanaskan di *Air heater* diharapkan 230 °C agar memudahkan proses pembakaran. Temperatur *flue gas* melewati *Air heater* cukup tinggi sekitar 290 °C maka elemen – elemen *Air heater* harus tahan panas.

Temperatur *flue gas* setelah *Air heater* dijaga diatas 135 °C, tujuannya adalah untuk mencegah pengendapan sulfur pada sisi dingin *Air heater*. Karena sulfur dapat menyebabkan korosi pada elemen – elemen *Air heater*. Namun temperatur *flue gas* keluar *Air heater* juga dijaga dibawah 160 °C, tujuannya adalah agar tidak merusak lingkungan atau dengan kata lain merusak lapisan ozon. Besar panas yang diserap oleh *Air heater* ini dari *flue gas* untuk memanaskan udara pembakaran dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Q_{AH} = (W_a)_{akt} \times C_{pudara} (T_{out} - T_{in}) \text{ kJ/jam} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

- Q_{AH} : panas yang diserap oleh *Air heater* (kJ/jam)
- $(W_a)_{akt}$: berat udara sebenarnya (kg/jam)
- C_{pair} : panas jenis udara (kJ/Kg⁰C)
- T_{out} : temperatur udara keluar *Air heater* (⁰C)
- H_{in} : temperatur udara masuk *Air heater* (⁰C)



Gambar 2.15 *Air heater*

2.4. Siklus Rankine

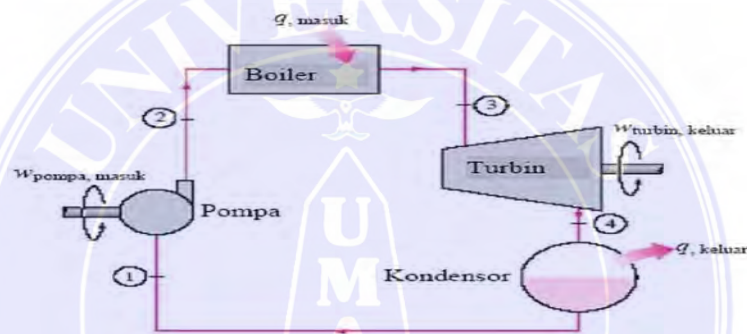
Siklus *Rankine* adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan di seluruh dunia [11]. Siklus ini dinamai untuk mengenang ilmuwan Skotlandia, William John Macquorn Rankine.

Siklus *Rankine* adalah model operasi mesin uap panas yang secara umum ditemukan di pembangkit listrik. Sumber panas yang utama untuk siklus *Rankine* adalah batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir, dan panas matahari.

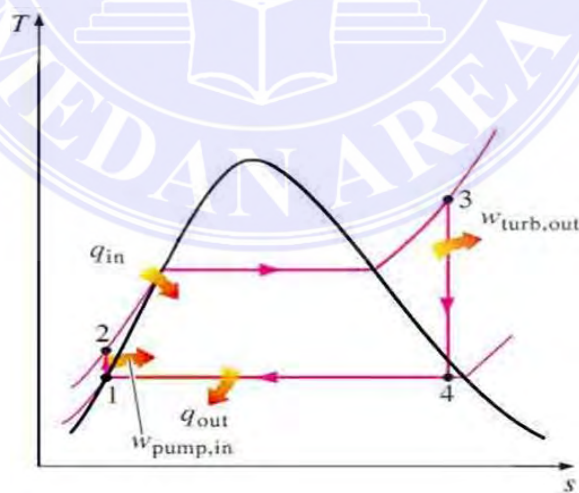
Siklus *Rankine* kadang-kadang diaplikasikan sebagai siklus Carnot, terutama dalam menghitung efisiensi. Perbedaannya hanyalah siklus ini menggunakan fluida yang bertekanan, bukan gas. Efisiensi siklus *Rankine* biasanya dibatasi oleh fluidanya. Tanpa tekanan yang mengarah pada keadaan super kritis, range temperatur akan cukup kecil. Uap memasuki turbin pada

temperatur 565°C (batas ketahanan stainless steel) dan kondenser bertemperatur sekitar 30°C . Hal ini memberikan efisiensi Carnot secara teoritis sebesar 63%, namun kenyataannya efisiensi pada pembangkit listrik tenaga batu bara sebesar 42%.

Fluida pada Siklus *Rankine* mengikuti aliran tertutup dan digunakan secara konstan. Berbagai jenis fluida dapat digunakan pada siklus ini, namun air dipilih karena berbagai karakteristik fisika dan kimia, seperti tidak beracun, terdapat dalam jumlah besar, dan murah.



Gambar 2.16 Bagan sederhana siklus *Rankine*



Gambar 2.17 diagram T-s siklus *Rankine*

Siklus *Rankine* ideal terdiri dari 4 tahapan proses :

1 – 2 = proses kompresi isentropik dengan pompa

2 – 3 = Penambahan panas dalam *Boiler* pada $P = \text{konstan}$

3 – 4 = Ekspansi isentropik ke dalam turbin

4 – 1 = Pelepasan panas di dalam kondensor pada $P = \text{konstan}$

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi *Boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik ini melalui sedikit pengurangan dari volume spesifik air. Jarak vertikal antara 1–2 pada T - s diagram ini biasanya diletakkan untuk lebih amannya proses.

Air memasuki *Boiler* sebagai cairan terkompresi pada kondisi 2 dan akan menjadi uap superheated pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh *Boiler* ke air pada T tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai steam generator.

Uap superheated pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dihasilkanlah listrik. P dan T dari steam akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana steam akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. Steam ini akan dicairkan pada P konstan di dalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

Area dibawah kurva proses 2–3 menunjukkan panas yang ditransfer ke *Boiler*, dan area dibawah kurva proses 4–1 menunjukkan panas yang dilepaskan di kondenser. Perbedaan dari kedua aliran ini adalah kerja netto yang dihasilkan selama siklus.

2.5. Jenis-jenis Pemanas Udara

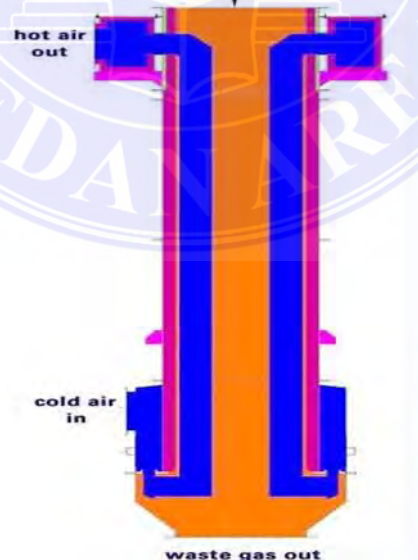
Pemanas udara memiliki dua tipe yaitu : [5]

1. Pemanas udara tipe *rekuperatif*

Alat pemanas udara tipe *rekuperatif*, kalor berpindah secara langsung dari panas gas buang (flue gas) ke udara yang melintas pada permukaan penukar kalor ini, biasanya berbentuk tabung, walaupun ada yang berbentuk plat.

Unit model tabung biasanya berupa penukar kalor selongsong dan tabung aliran berlawanan arah, dimana gas mengalir di dalam tabung-tabung lurus vertikal dan horizontal.

Pemanas udara jenis tabung terdiri atas beberapa macam rancangan yang disesuaikan dengan ruang dan denah pembangkit uap. Pemanas udara ini ada yang mempunyai satu lintasan vertikal dan horizontal dan aliran searah dan berlawanan arah, alat pemanas udara ini dapat dilihat pada gambar 2.18 di bawah ini.



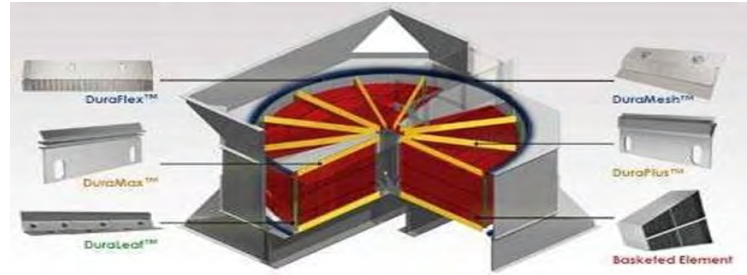
Gambar 2.18 *Air heater rekuperatif*

2. Pemanas udara tipe *regenerative*

Pemanas udara tipe *regenerative* seperti pada gambar 2.19 dibawah ini mempunyai sistem atau bekerja berdasarkan regenerasi. Unit ini terdiri dari rotor yang diputar oleh motor listrik melalui roda gigi reduksi sehingga berputar dengan kecepatan rendah 1-3 rpm. Rotor ini dibagi oleh ruji-ruji dari plat dan dibagi beberapa sektor, dan setor-sektor tersebut diisi oleh plat-plat tipis dan bergelombang sehingga terjadi suatu saluran yang sangat sempit yang menjadi laluan udara dan asap.

Panas udara ini dapat dipakai untuk instalasi-instalasi darat maupun laut. Dengan susunan yang dibuat sedemikian rupa sehingga satu fan menekan udara pembakaran ke dapur api melalui rotor, sedangkan sebagian fan lain menghisap gas asap dari saluran gas asap ke cerobong yang terletak di sebelah ruang pemisah (berbentuk sector sektor). Gas-gas asap ini akan memanaskan lempengan-lempengan yang berombak seiring udara pembakaran akan masuk ke ruang pemisah, sedangkan disisi lain akan mengalami pemanasn dari lempengan-lempengan pemanas sehingga temperaturnya akan naik sesuai yang direncanakan.

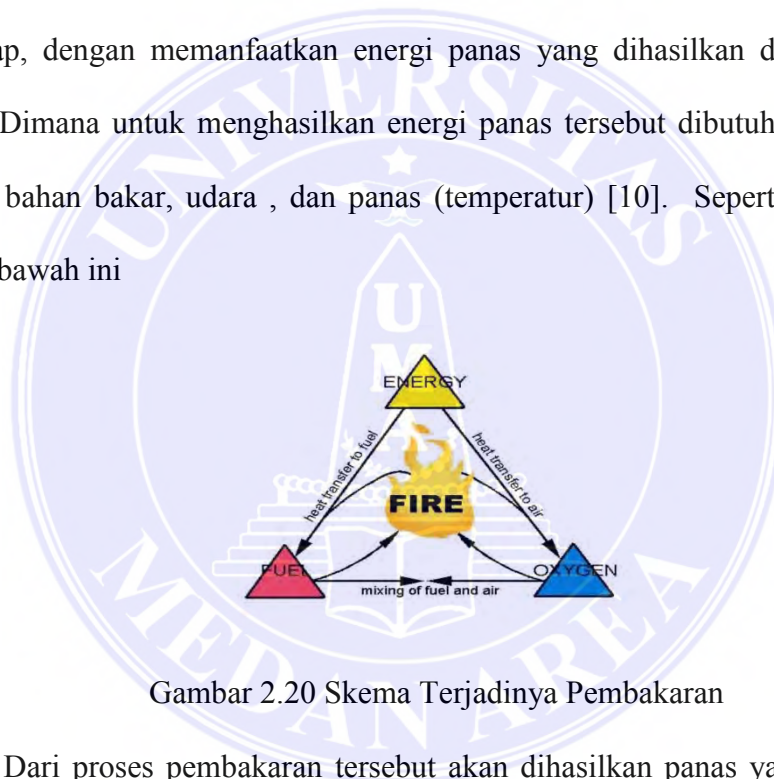
Rotor akan menggerakkan pemanas udara secara perlahan-lahan, hal ini berfungsi untuk mengambil panas dari gas buang secara optimal dan sisi lainnya pemanas udara akan mengarahkan panas ke udara pembakar.



Gambar 2.19 *Air heater regenerative*

2.6. Aliran Gas Buang dan Udara

Ketel uap (*Boiler*) merupakan alat yang dapat mengubah fase air menjadi fase uap, dengan memanfaatkan energi panas yang dihasilkan di dalam ruang bakar. Dimana untuk menghasilkan energi panas tersebut dibutuhkan tiga unsur yaitu : bahan bakar, udara , dan panas (temperatur) [10]. Seperti pada gambar 2.20 dibawah ini

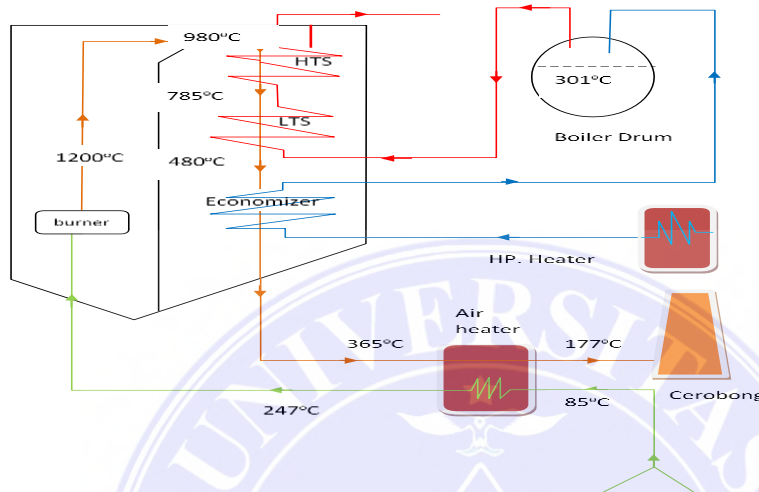
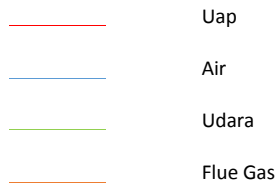


Gambar 2.20 Skema Terjadinya Pembakaran

Dari proses pembakaran tersebut akan dihasilkan panas yang berdampak pada temperatur, sedangkan sisa pembakaran adalah gas buang (*flue gas*). Gas buang dari ruang bakar digunakan untuk memanaskan air, uap, dan udara pembakaran, karena gas buang dari ruang bakar mempunyai temperatur dan tekanan yang tinggi sehingga dimanfaatkan untuk peningkatan efisiensi *Boiler*.

Aliran gas buang yang masih mengandung energi panas pertama dimanfaatkan oleh “ *Superheater*” untuk memanaskan uap jenuh menjadi panas lanjut. Temperatur gas buang (flue gas) ini yang masuk ke *Superheater* sekitar 950°C-1000°C. Setelah itu gas buang yang keluar dari *Superheater* ini dengan temperatur sekitar 480°C-600°C dimanfaatkan untuk memanaskan air di ekonomiser sebelum air dipompakan ke *boiler* drum. Kemudian gas buang dari ekonomiser tersebut akan diteruskan lagi ke alat pemanas udara (*Air heater*) dengan temperatur sekitar 350°C-390°C akan digunakan untuk memanaskan udara pembakaran. Udara pembakaran ini berasal dari lingkungan yang dihisap oleh fan dengan temperatur sekitar 30°C dan tekanan 1 atm. Gas buang keluar alat pemanas udara (*Air heater*) akan dibuang melalui cerobong asap, dimana temperaturnya sekitar 140°C-200°C.

Udara yang dihisap oleh fan sebelum masuk ke alat pemanas udara (*air heater*) terlebih dahulu dipanaskan di alat pemanas awal udara (*air preheater*) dengan fluida pemanas adalah uap yang dialirkan dari *ash* sehingga temperatur udara akan naik sekitar 80°C dan tekanan akan turun sekitar 0.95 atm. Kemudian udara akan dipanaskan di alat pemanas udara (*Air heater*). Temperatur udara yang keluar dari alat ini sekitas 250°C-300°C dan tekanan sekitar 0.90 atm, kemudian udara pembakaran ini akan dialirkan ke ruang bakar (*burner*). Berikut gambar aliran gas buang (*flue gas*) dan udara.



Gambar 2.21 Aliran Uap, Air, Udara, dan *Flue Gas*

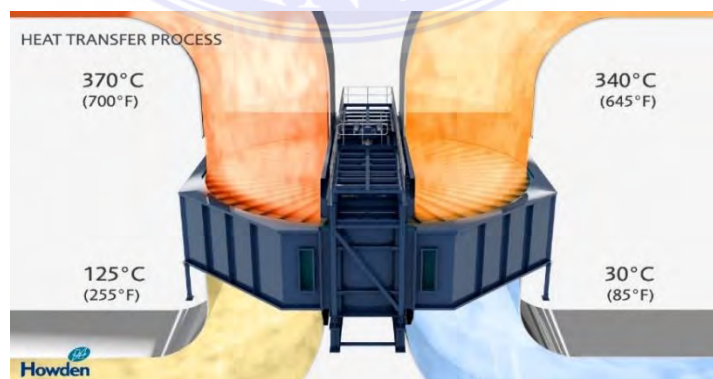
Air dari feed water tank dipanaskan di *HP. Heater* menggunakan panas hasil ekstraksi pada turbin. Kemudian air yang dipanaskan akan dipompakan masuk *economizer* dengan suhu sekitar 160°C . Dan pada *economizer* air juga akan dipanaskan dengan menggunakan *flue gas* dengan suhu sekitar 480°C dan suhu air pada *economizer* sekitar 206°C . Setelah air dipanaskan, air akan masuk *Boiler drum* dan akan dipisahkan antara air dan uap. Uap akan masuk ke *low temperature Superheater* (*primary Superheater*) untuk dipanaskan lanjut dengan *flue gas* dengan temperatur sekitar 785°C dan temperatur uap yang dihasilkan pada *low temperature Superheater* ini sekitar 426°C selanjutnya uap akan masuk ke *high temperatur Superheater* (*secondary Superheater*) untuk dipanaskan lanjut sebelum uap masuk ke turbin. Pada uap juga dipanaskan dengan *flue gas* dari ruang bakar dengan temperatur sekitar 980°C dan temperatur uap yang dihasilkan

adalah sekitar 505°C pada tekanan 85 bar dan akan di alirkan ke turbin yang akan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Flue gas yang dipakai untuk memanaskan *high temperature Superheater*, *low temperature Superheater*, dan *economizer* tersebut sebelum dialirkan ke cerobong terlebih dahulu digunakan untuk memanaskan udara pembakaran. Udara yang dihisap oleh *forced draught fan* (FDF) akan dipanaskan terlebih dahulu di *Air heater*. Setelah dipanaskan udara tersebut akan dialirkan ke *burner* sedangkan *flue gas* tersebut akan dialirkan ke cerobong dan akan dilepaskan ke atmosfer.

2.7. Prinsip Kerja Pemanas Udara

Alat pemanas udara (*Air heater*) tipe *regenerative* memakai susunan rotor yang hampir setengah elemennya dipasang pada saluran gas buang (*flue gas*) dan setengah lagi dipasang pada saluran suplai udara pembakaran [5]. Alat pemanas udara (*Air heater*) ini mempunyai dua sisi aliran yang berbeda yaitu sisi panas (*hot*) dan sisi dingin (*cool*). Sisi panas merupakan sisi aliran gas buang dan sisi dingin merupakan sisi aliran udara yang akan dipanaskan seperti gambar 2.22 berikut



Gambar 2.22 *Air heater*

Diantara sisi panas dan dingin terdapat elemen dari plat-plat yang mampu menyerap panas dan melepas panas. Ukuran penampang dari sisi panas lebih besar bila dibandingkan dengan sisi dingin, hal ini diharapkan supaya elemen dari alat pemanas udara ini mampu menyerap energi panas yang terkandung pada gas buang sebanyak mungkin.

Alat pemanas udara ini mempunyai kecepatan putaran sekitar 1.4-1.6 rpm. Hal ini mempunyai tujuan agar gas buang yang melewati sisi panas dapat bertahan lebih lama sehingga elemen ini mampu menyerap panas yang terkandung pada gas buang sebanyak mungkin dan pada elemen sisi dingin diharapkan udara yang lewat mampu menyerap panas dari elemen yang dipanaskan oleh gas buang.

Elemen yang berputar terdiri dari lapisan yang bergelombang dan secara bergantian dipanaskan gas buang dan sebaliknya didinginkan oleh udara. Elemen bergelombang tersebut terdiri dari dua sigmen yaitu : sigmen atas dan sigmen bawah. Dengan di putar oleh rotor posisi sisi panas dan dingin akan bergantian secara periodik.

2.7.1 Komponen Air heater

1. Elemen panas

Elemen pemanas yang berupa lempengan-lempengan plat metal yang terbagi menjadi 2 bagian secara vertikal yaitu sisi atas *Hot End layer* dan sisi bawah *Cold End layer*. Plat itu terpasang pada suatu poros yang di susun pada kompartemen silindris yang terbagi secara radial yang semua bagiannya di sebut sebagai rotor. Rotor ini berputar dalam ruangan yang memiliki sambungan *duct* di kedua sisinya satu sisi di aliri gas buang, sisi lain berisi udara baik primer maupun sekunder. Saat rotor diputar, setengah bagiannya memasuki saluran gas buang dan

menyerap energi panas yang terkandung di dalamnya sedangkan setengah bagian yang lain mentransfer panas dari elemen ke udara pada sisi saluran udara sehingga menghasilkan udara panas yang selanjutnya akan dipasok ke *furnace*.

2. Pengerak rotor

Rotor di gerakan oleh motor listrik yang diletakan di luar elemen pemanas. Penggerak rotor dihubungkan pada *central*, dan terdapat dua motor penggerak yang mempunyai kecepatan 1455 rpm. Dua motor tersebut dihubungkan dengan *central* melalui *gearbox* dengan rasio transmisi 9.110/1 yang dihubungkan oleh kopleng feksibel pada *gearbox* kedua. *Gearbox* kedua menggunakan roda gigi cacing (*worm gear*) dengan dua langkah, yang pertama dengan rasio 43/4 dan yang kedua 59/4. Setelah kecepatan berkurang dengan dua *gearbox*, rasionya menjadi 1444.5/1, keluaran main motor menjadi 1,07 rpm dan *auxiliary* menjadi 0,5 rpm.

3. Seal rotor

Seal (perapat) berfungsi sebagai pencegah kebocoran fluida baik udara maupun gas buang yang melewati elemen panas pada saat operasi. Pada kondisi normal aliran udara memiliki level tekanan yang lebih tinggi dari aliran gas.

2.8. Proses Perpindahan Panas

Menurut Hukum Termodinamika Kedua “ Bahwa tidak mungkin menukar tenaga kalor keseluruhan menjadi tenaga bersih”[12]. Akan tetapi prinsip dalam termodinamika yang dikemukakan oleh Josep Black yang dikenal dengan sebutan Asas Black “ Bahwa panas yang diserap sama dengan panas yang dilepas”, yaitu :

$$Q_{\text{serap}} = Q_{\text{lepas}}$$

Pada alat pemanas udara, fluida yang menyerap panas adalah udara, sedangkan fluida yang melepaskan panas adalah gas buang. Dalam hal ini besar panas yang diserap udara dan besar panas yang dilepas gas buang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Menurut (J.P Holman, 1997), sifat fluida dingin dievaluasi pada temperatur rata-rata adalah :

$$T_c = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

T_{ci} : temperatur udara masuk (°C)

T_{co} : temperatur udara keluar (°C)

Sedangkan untuk sifat fluida panas :

$$T_h = \frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

T_{hi} :temperatur gas buang masuk (°C)

T_{ho} :temperatur gas buang keluar (°C)

Besar panas yang diserap fluida dingin (udara) adalah sebagai berikut :

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

$$Q_{\text{serap}} = m_{\text{udara}} \times c_{p \text{ udara}} \times (T_{u.out} - T_{u.in}) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

Q_{serap} : besar panas yang diserap udara (°C)

m_{udara} : laju aliran massa udara (kg/jam)

- $c_{p \text{ udara}}$: panas jenis udara (kJ/kg °C)
- $T_{u \text{ out}}$: temperatur udara keluar (°C)
- $T_{u \text{ in}}$: temperatur udara masuk (°C)

Sedangkan panas yang dilepas gas buang adalah:

$$Q_{\text{lepas}} = m_{g.\text{buang}} \times c_{p \text{ g.buang}} \times (T_{g.\text{b.in}} - T_{g.\text{b.out}}) \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

- Q_{lepas} : besar panas yang dilepas gas buang (kJ/jam)
- $M_{g \text{ buang}}$: laju aliran gas buang (kg/jam)
- $C_{p \text{ g.buang}}$: panas jenis gas buang (kJ/kg °C)
- $T_{g.\text{b.in}}$: temperatur gas buang masuk (°C)
- $T_{g.\text{b.out}}$: temperatur gas buang keluar (°C)

2.9. Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Biasanya bahan bakar mengandung energi panas yang dapat dilepaskan dan dimanipulasi. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi redoks) dimana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara. Proses lain untuk melepaskan energi dari bahan bakar adalah melalui reaksi eksotermal dan reaksi nuklir (seperti Fisi nuklir atau Fusi nuklir). Hidrokarbon (termasuk di dalamnya bensin dan solar) sejauh ini merupakan jenis bahan bakar yang paling sering digunakan manusia. Bahan bakar lainnya yang bisa dipakai adalah logam radioaktif.[10]

Berdasarkan wujudnya bahan bakar terbagi atas tiga jenis yaitu :

a. Bahan bakar padat

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar berbentuk padat, dan kebanyakan menjadi sumber energi panas. Misalnya kayu dan batubara. Energi panas yang dihasilkan bisa digunakan untuk memanaskan air menjadi uap untuk menggerakkan peralatan dan menyediakan energi.

b. Bahan bakar cair

Bahan bakar cair adalah bahan bakar yang strukturnya tidak rapat, jika dibandingkan dengan bahan bakar padat molekulnya dapat bergerak bebas. Bensin/gasolin/premium, minyak solar, minyak tanah adalah contoh bahan bakar cair. Bahan bakar cair yang biasa dipakai dalam industri, transportasi maupun rumah tangga adalah fraksi minyak bumi. Minyak bumi adalah campuran berbagai hidrokarbon yang termasuk dalam kelompok senyawa: parafin, naphtena, olefin, dan aromatik. Kelompok senyawa ini berbeda dari yang lain dalam kandungan hidrogennya. Minyak mentah, jika disuling akan menghasilkan beberapa macam fraksi, seperti: bensin atau premium, kerosen atau minyak tanah, minyak solar, minyak bakar, dan lain-lain. Setiap minyak petroleum mentah mengandung keempat kelompok senyawa tersebut, tetapi perbandingannya berbeda

c. Bahan bakar gas

Bahan bakar gas ada dua jenis, yakni Compressed Natural Gas (CNG) dan Liquid Petroleum Gas (LPG). CNG pada dasarnya terdiri dari metana sedangkan LPG adalah campuran dari propana, butana dan bahan kimia lainnya. LPG yang digunakan untuk kompor rumah tangga, sama bahannya dengan Bahan Bakar Gas yang biasa digunakan untuk sebagian kendaraan bermotor.

Berdasarkan materinya terbagi atas dua yaitu :

a. Bahan bakar tidak berkelanjutan

Bahan bakar tidak berkelanjutan bersumber pada materi yang diambil dari alam dan bersifat konsumtif. Sehingga hanya bisa sekali dipergunakan dan bisa habis keberadaannya di alam. Misalnya bahan bakar berbasis karbon seperti produk-produk olahan minyak bumi.

b. Bahan bakar berkelanjutan

Bahan bakar berkelanjutan bersumber pada materi yang masih bisa digunakan lagi dan tidak akan habis keberadaannya di alam. Misalnya tenaga matahari.

Dalam pemilihan bahan bakar ketel uap (*boiler*) hal yang perlu dipertimbangkan adalah sebagai berikut :

- a. Bahan bakar tersebut mudah didapat
- b. Harga bahan bakar relatif murah
- c. Nilai kalor dari bahan bakar cukup baik dan waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan panas atau terbakar tidak terlalu lama
- d. Tidak mengandung logam berat
- e. Kadar abu lebih rendah
- f. Tidak rusak pada penyimpanan dalam waktu yang lama
- g. Memiliki efisiensi yang tinggi pada sistem pembakaran

2.9.1. Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor (*heating value*) adalah banyaknya energi panas yang diperoleh dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar. Nilai kalor ini dibagi menjadi dua :

- a. Nilai kalor tertinggi atau *High Heating Value* (HHV)

Nilai kalor tertinggi atau *High Heating Value* (HHV) adalah banyaknya kalor yang dihasilkan pada proses pembakaran 1 kg bahan bakar, tanpa adanya kandungan air pada bahan bakar. Untuk menghitung nilai kalor tertinggi (HHV) digunakan persamaan Dulong dan Petit berikut.

$$\text{HHV} = (33950 \times C) + 144200\left(\text{H}_2 - \frac{\text{O}_2}{8}\right) + (9400 \times S) \quad \text{kJ/kg} \dots\dots\dots(2.9)$$

- b. Nilai kalor terendah atau *Low Heating Value* (LHV)

Nilai kalor terendah atau *Low Heating Value* (LHV) adalah banyaknya kalor yang dihasilkan pada proses pembakaran 1 kg bahan bakar dan sebagian dimanfaatkan untuk penguapan sehingga kandungan air pada bahan bakar akan habis. Untuk menghitung nilai kalor terendah (LHV) digunakan persamaan berikut.

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400(\text{H}_2\text{O} + 9\text{H}_2) \quad \text{kJ/kg} \dots\dots\dots(2.10)$$

2.9.2. Kebutuhan Bahan Bakar

Dalam menentukan banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini [6].

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_s (h_{sup} - h_a)}{L \times k} \quad (\text{kg/jam}) \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

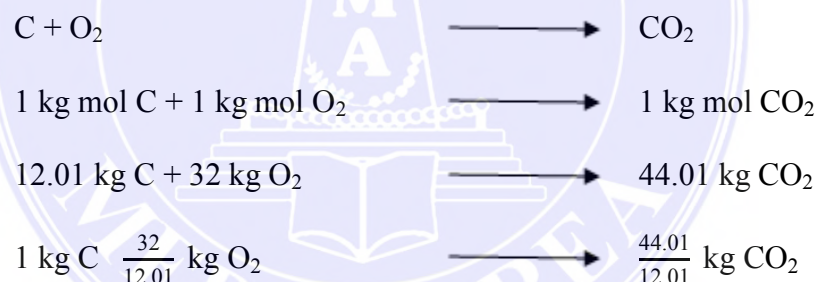
- \dot{m}_f : Banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan (kg_{b.bakar}/jam)
- \dot{m}_s : Kapasitas uap
- h_{sup} : Entalpi uap keluar superheater
- h_a : Entalpi air pengisi ketel uap
- LHV : Nilai kalor rendah bahan bakar (kJ/kg)

η_k : Efisiensi thermal boiler (0.70) (John R Howell ; Richard O Buckius)

2.10. Udara Pembakaran Ruang Bakar

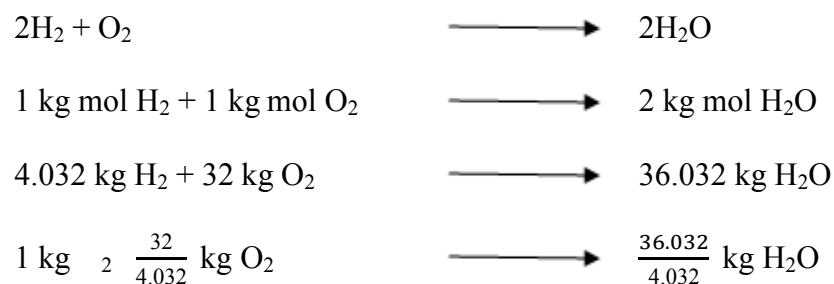
Untuk memperoleh pembakaran yang sempurna pada ruang bakar dibutuhkan perbandingan udara dan bahan bakar di dalam ruang bakar untuk menentukan udara minimum. Hal ini dapat dinyatakan dalam kg udara per kg bahan bakar atau dalam kg mol udara per kg mol bahan bakar [10]. Komposisi kimia bahan bakar residu yang bereaksi dengan Oksigen (O_2) pada proses pembakaran sempurna adalah : Karbon (C), Hidrogen (H_2), dan Sulfur (S) dalam hasil reaksi sebagai berikut :

a. Unsur karbon (C)



Jadi pada setiap pembakaran 1 kg C secara sempurna dibutuhkan oksigen minimum 2.66 kg dan akan menghasilkan karbon dioksida 3.66 kg.

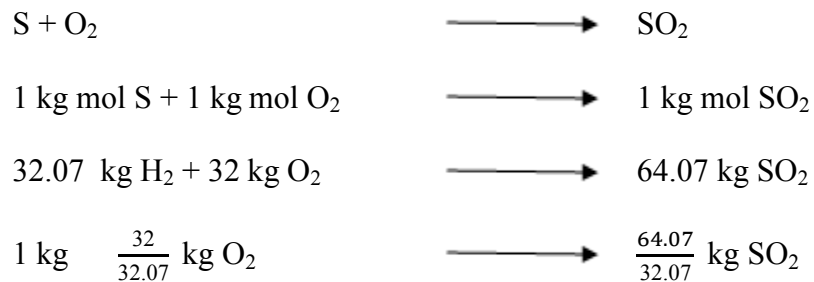
b. Unsur Hidrogen (H_2)



Jadi pada setiap pembakaran 1 kg H_2 secara sempurna dibutuhkan oksigen

minimum 7.94 kg dan akan menghasilkan uap air 8.9365 kg.

c. Sulfur (S)



Jadi pada setiap pembakaran 1 kg S secara sempurna dibutuhkan oksigen minimum 0.998 kg dan akan menghasilkan sulfur dioksida 1.998 kg.

Dalam menentukan kebutuhan udara pembakaran pada ruang bakar dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

Kebutuhan udara teoritis adalah :

$$(W_a)_{th} = \frac{(2.66 \times C) + (7.94 \times \frac{H}{2}) + (0.998 \times O) - 2}{0.232} \text{ kg}_{udara}/\text{kg}_{b.bakar} \dots\dots (2.12)$$

Dimana:

$(W_a)_{th}$: Kebutuhan udara teoritis ($\text{kg}_{udara}/\text{kg}_{b.bakar}$)

Pembakaran yang sempurna membutuhkan udara berlebih. Udara berlebih ini diperlukan untuk memastikan pembakaran yang terjadi di ruang bakar sempurna atau tidak sempurna. Oleh sebab itu apabila hanya menghitung udara teoritis dikhawatirkan pembakaran di ruang bakar tidak sempurna. Jadi untuk menentukan kebutuhan udara aktual dapat diperoleh dari persamaan berikut.

Kebutuhan Udara Aktual adalah :

$$(W_a)_{act} = (W_a)_{th} + (f_a \times (W_a)_{th}) \text{ kg}_{udara}/\text{kg}_{b.bakar} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

$(W_a)_{act}$: Kebutuhan udara aktual ($\text{kg}_{udara}/\text{kg}_{b.bakar}$)

fa :faktor udara berlebih

Tabel 2. 1 *Excess Air Required By Some Fuel Systems*

<i>Fuel</i>	<i>System</i>	<i>Excess air (%)</i>
<i>Coal</i>	<i>Pulverized, completely water-cooled furnace</i>	15-20
	<i>Pulverized, partially water-cooled furnace</i>	15-40
	<i>Spreader stoker</i>	30-60
	<i>Chain gate and traveling stoker</i>	15-50
	<i>Crushed, cyclone furnace</i>	10-15
<i>Fuel oil</i>	<i>Oil burner</i>	5-10
	<i>Multifuel burner</i>	10-20
<i>Gas</i>	<i>Gas burner</i>	5-10
	<i>Multifuel burner</i>	7-12

umber : A.K. Raja, Amit Prakash rivastava 2006 “ *Power Plant Engineering*”

Banyaknya kebutuhan udara pembakaran tiap jam adalah :

$$W_{total} = \dot{m}_f \times (W_a)_{act} \text{ Kg}_{udara}/\text{jam} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

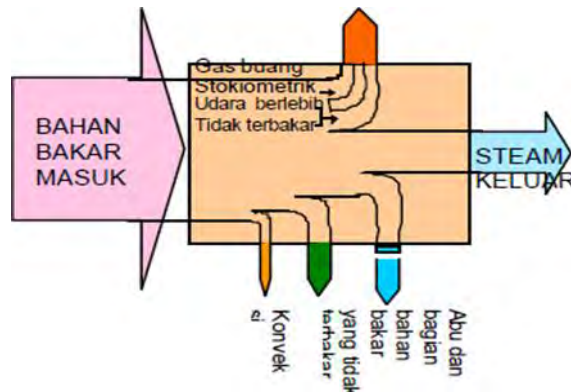
W_{total} : Kebutuhan udara total (Kg_{udara}/jam)

\dot{m}_f : Banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan (kg_{b.bakar}/jam)

$(W_a)_{act}$: Kebutuhan udara aktual (kg_{udara}/kg_{b.bakar})

2.11. Efisiensi Boiler

Efisiensi termis *Boiler* adalah energi panas masuk yang digunakan secara efektif untuk menghasilkan steam [7]. Diagram neraca energi dapat dilihat seperti pada gambar 2.23 dibawah ini



Gambar 2.23 Diagram neraca energi

Neraca panas merupakan keseimbangan energi total yang masuk *Boiler* terhadap yang meninggalkan *Boiler* dalam bentuk yang berbeda. Gambar berikut memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan *steam*.

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada skripsi ini adalah metode langsung. Secara umum skripsi ini akan membahas analisa nilai kalor bahan bakar dan perhitungan efisiensi *Boiler*. Terdapat dua metode pengkajian efisiensi *Boiler* :

1. Metode langsung

Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar *Boiler* [8]. Metodologi Dikenal juga sebagai, metode input-output' karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/output (steam) dan panas masuk/input (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi. Efisiensi ini dapat di evaluasi dengan menggunakan rumus:

$$\text{Efisiensi Boiler, } \eta_{th} = \frac{Q_{keluar}}{Q_{masuk}} \times 100 \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

η_{th} : Efisiensi *Boiler*

Q_{in} : Energi panas yang masuk (kJ/jam)

Q_{out} : Energi panas yang keluar (kJ/jam)

Energi masuk adalah energi panas yang dihasilkan pada proses pembakaran, dapat ditentukan dengan persamaan berikut [10].

$$Q_{in} = \dot{m}_f \times \text{LHV} \times \eta_f \text{ (Kg/jam)} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

Q_{in} : Energi panas yang dihasilkan (Kg/jam)

\dot{m}_f : Banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan (Kg/jam)

LHV : Nilai kalor terendah bahan bakar (kJ/kg)

η_f : Efisiensi dapur teori berkisar 90%-97% diasumsikan 95%

(Syamsir A. Muin)

Energi keluar adalah energi yang diperlukan untuk pembentukan uap saturasi pada boiler, dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{sat} = \dot{m}_s \times (h_{sat} - h_a) \text{ kJ/jam} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

Q_{sat} : Energi panas yang diperlukan untuk mengubah air menjadi uap (kJ/jam)

\dot{m}_s : Kapasitas aliran uap (kg/jam)

h_{sat} : Entalpi uap saturasi (kJ/kg)

h_a : Entalpi air pengisi ketel uap (kJ/kg)

Keuntungan metode langsung :

- a. Pekerja pabrik dapat dengan cepat mengevaluasi efisiensi *Boiler*
- b. Memerlukan sedikit parameter untuk perhitungan
- c. Memerlukan sedikit instrumen untuk pemantauan

- d. Mudah membandingkan rasio penguapan dengan data benchmark

Kerugian metode langsung :

- a. Tidak memberikan petunjuk kepada operator tentang penyebab dari efisiensi sistem yang lebih rendah
- b. Tidak menghitung berbagai kehilangan yang berpengaruh pada berbagai tingkat efisiensi

2. Metode tidak langsung

Efisiensi merupakan perbedaan antar kehilangan dan energi masuk. Metodologi Standar acuan untuk Uji *Boiler* di tempat dengan menggunakan metode tidak langsung adalah British Standard, BS 845:1987 dan USA Standard ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units. Metode tidak langsung juga dikenal dengan metode kehilangan panas. Efisiensi dapat dihitung dengan mengurangkan bagian kehilangan panas dari 100 sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Boiler, } \eta_{th} = 100\% - (i + ii + iii + iv + v + vi + vii)\% \dots \dots (2.18)$$

Dimana kehilangan yang terjadi dalam *Boiler* adalah kehilangan panas yang diakibatkan oleh:

- i. Gas cerobong yang kering
- ii. Penguapan air yang terbentuk karena H₂ dalam bahan bakar
- iii. Penguapan kadar air dalam bahan bakar
- iv. Adanya kadar air dalam udara pembakaran
- v. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu terbang/ fly ash
- vi. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu bawah/ bottom ash
- vii. Radiasi dan kehilangan lain yang tidak dihitung.

Kehilangan yang diakibatkan oleh kadar air dalam bahan bakar dan yang disebabkan oleh pembakaran hidrogen tergantung pada bahan bakar, dan tidak dapat dikendalikan oleh perancangan. Data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi *Boiler* dengan menggunakan metode tidak langsung adalah:

Analisis ultimate bahan bakar (H_2 , O_2 , S, C, kadar air, kadar abu)

- a. Persentase oksigen atau CO_2 dalam gas buang
- b. Suhu gas buang dalam $^{\circ}C$ (T_f)
- c. Suhu awal dalam $^{\circ}C$ (T_a) dan kelembaban udara dalam kg/kg udara kering
- d. LHV bahan bakar dalam kkal/kg
- e. Persentase bahan yang dapat terbakar dalam abu (untuk bahan bakar padat)
- f. LHV abu dalam kkal/kg (untuk bahan bakar padat)

Keuntungan metode tidak langsung:

Dapat diketahui neraca bahan dan energi yang lengkap untuk setiap aliran, yang dapat memudahkan dalam mengidentifikasi opsi-opsi untuk meningkatkan efisiensi *Boiler*.

Kerugian metode tidak langsung:

1. Perlu waktu lama.
2. Memerlukan fasilitas laboratorium untuk analisis.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1. Tempat Penelitian

Tempat penulis melakukan penelitian adalah di Unit 3 PLTU PT. PLN (persero) Unit UPK Belawan. PT. PLN (persero) ini merupakan penyuplai listrik terbesar untuk daerah Sumatera Utara dan NAD. PT. PLN ini mempunyai empat pembangkit tenaga uap (PLTU) dan empat pembangkit tenaga gas uap (PLTGU). Gambar 3.1 merupakan tempat/lokasi PLTU UPK Belawan yang luasnya sekitar 47 Ha.



Gambar 3.1 Wilayah Pembangkit UPK Belawan

3.1.2. Waktu Penelitian

Analisis ini dimulai sejak judul tugas akhir ini disetujui oleh kedua pembimbing. Kemudian waktu yang akan digunakan dari persiapan penyusunan tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan						
		Maret 2019	April 2019	Mei 2019	Juni 2019	Juli 2019	Agustus 2019	September 2019
1	Penyusunan Proposal skripsi							
2	Seminar Proposal							
3	Pengambilan data							
4	Analisis data							
5	Seminar Hasil							
6	Sidang Skripsi							

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Alat yang digunakan untuk memperoleh data di Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) UPK Belawan yaitu sebagai berikut :

- a. *Manometer* logam, digunakan untuk mengukur tekanan tinggi uap atau gas. Misalnya tekanan dalam ketel uap dan turbin. Pembacaan data dilakukan di *control room*.
- b. *Thermometer*, digunakan untuk mengukur suhu air dan uap pada SPTU.

Hasil pengukuran kemudian akan disampaikan ke *control room*.

- c. *Orificemeter*, digunakan untuk mengukur jumlah aliran air atau yang uap yang masuk ke komponen SPTU. Pembacaan data dilakukan di *control room*.

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan adalah data yang diperoleh dari tempat penelitian yang meliputi data pengamatan boiler dan sifat fisik minyak residu. Contoh bahan- bahan tersebut dapat dilihat pada tabel 3.2 dan tabel 3.3

Tabel 3.2 Data Pengamatan Operasi Boiler Unit 3 PLTU Belawan

No	Parameter	Pengamatan	Satuan
1	Kapasitas <i>Boiler</i>	90.3	Ton/jam
2	Temperatur uap keluar <i>high temperature Superheater</i>	489	°C
3	Tekanan uap keluar <i>high temperature Superheater</i>	86	Bar
4	Temperatur uap masuk <i>high temperature Superheater</i>	359	°C
5	Temperatur uap keluar <i>low temperature Superheater</i>	416	°C
6	Temperatur uap masuk <i>low temperature Superheater</i>	341	°C
7	Temperatur uap campur keluar <i>economizer</i>	181	°C
8	Temperatur uap campur masuk <i>economizer</i>	118	°C
9	Kapasitas air masuk <i>economizer</i>	96	Ton/jam
10	Temperatur flue gas masuk <i>Air heater</i>	320	°C
11	Temperatur flue gas keluar <i>Air heater</i>	120	°C
12	Temperatur udara masuk <i>Air heater</i>	55	°C
13	Temperatur udara keluar <i>Air heater</i>	140	°C
14	Temperatur Uap Saturasi	300	°C

Sumber: PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan

Tabel 3.3 Komposisi Minyak Residu

No	Unsur Kimia	Simbol	Persentase (%)
1	Karbon	C	85,033
2	Hidrogen	H ₂	10,320
3	Oksigen	O ₂	0,9
4	Nitrogen	N ₂	0,6
5	Sulfur	S	2,69
6	Air (<i>moisture</i>)	H ₂ O	0,4
7	Abu (<i>ash</i>)	A	0,057
Jumlah			100

Sumber: PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan

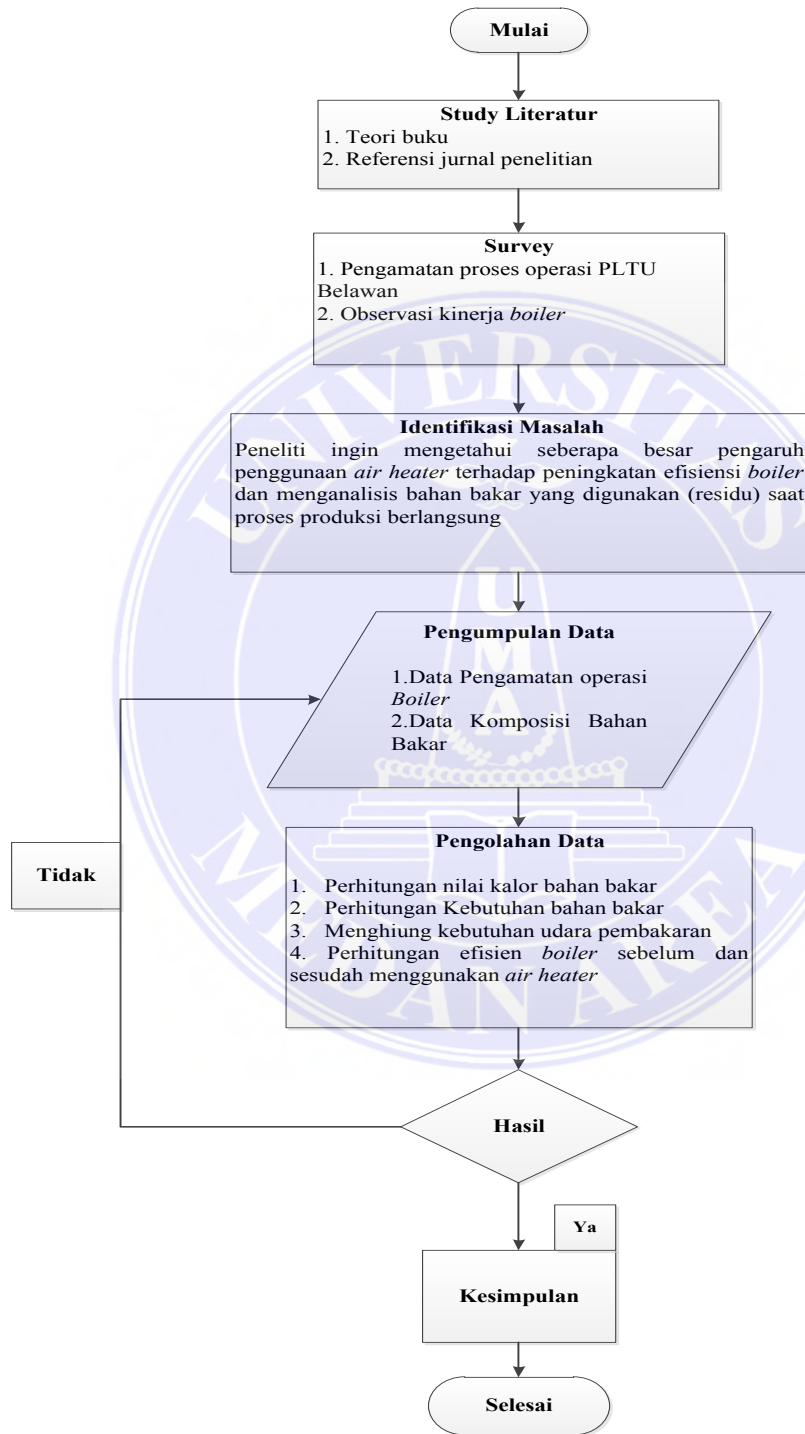
3.3. Analisis Data

Data-data yang telah didapat kemudian diperlukan penulis untuk melakukan analisis dari data yang didapat sesuai dengan studi literatur yang sudah dibuat sebelumnya. Analisis yang dilakukan adalah:

1. Menganalisis bahan bakar yang digunakan
2. Menghitung energi yang diserap setiap alat pemanas yang ada pada *Boiler*.
3. Menghitung kebutuhan bahan bakar dan kebutuhan udara pembakaran pada *boiler*.
4. Menghitung efisiensi *boiler* sebelum dan sesudah menggunakan *air heater*.

3.4. Metode Penelitian

Diagram alir dibawah ini menunjukkan langkah-langkah dalam menyelesaikan skripsi ini.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat penulis dari hasil penelitian dan perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Hasil analisis bahan bakar yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - a. Bahan bakar : Residu
 - b. Nilai kalor tertinggi (HHV) : 43,839.76 kJ/kg
 - c. Nilai kalor terendah (LHV) : 41,601.04 kJ/kg
 - d. Kapasitas bahan bakar (\dot{m}_f) : 8,047.63 kg/jam
 - e. Kebutuhan udara pembakaran (W_a) : 11,5023.97 Kg_{udara}/jam
2. Dari survey dan hasil perhitungan diperoleh nilai:
 - a. Kapasitas boiler (\dot{m}_s) : 90.3 ton/jam
 - b. Energi panas yang dihasilkan (Q_{in}) : 327,925,585.32 kJ/jam
 - c. Energi panas mengubah air menjadi uap : 178,915,002 kJ/jam
 - d. Energi panas yang diserap HTS : 32,896,290 kJ/jam
 - e. Energi panas yang diserap LTS : 21,729,792 kJ/jam
 - f. Energi panas yang diserap economizer : 13,144,203.45 kJ/jam
 - g. Energi panas yang diserap Air heater : 9,875,296.67 kJ/jam
 - h. Efisiensi boiler sebelum menggunakan air heater 77.56% dan setelah menggunakan air heater efisiensi meningkat menjadi 78.23%, jadi kenaikan efisiensi sebesar 0.67%.

5.2. Saran

1. Dari hasil penelitian yang diperoleh bahwa pengaruh *air heater* terhadap peningkatan efisiensi *boiler* unit pembangkit tenaga uap yang ada di PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan ini sangat kecil yaitu sekitar 0.67%, sehingga disarankan kepada pihak PLN agar melakukan proses *maintenance* terhadap *air heater*.
2. Pentingnya melakukan pengecekan/perawatan secara rutin terhadap komponen utama maupun pendukung *boiler* seperti pada *air heater* sehingga setiap komponen dari *boiler* dapat bekerja dengan maksimal sesuai dengan fungsinya.
3. Bagi peneliti selanjutnya, hendaknya melakukan penelitian terkait efisiensi *boiler* dengan metode tidak langsung sehingga dapat diketahui neraca bahan dan energi yang lengkap untuk setiap aliran, yang dapat memudahkan dalam mengidentifikasi opsi-opsi untuk meningkatkan efisiensi *Boiler*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prayudi *et al.*, “Analisis Efisiensi Air Preheater Sebelum Overhaul Dan Sesudah Overhaul Di Ujg Pltu Banten 3 Lontar Unit 3,” vol. 4, pp. 122–210, 2016.
- [2] PPIPE BPPT, “Outlook Energi Indonesia 2018 : energi berkelanjutan untuk transportasi darat,” 2018.
- [3] R. Nurhasanah, “PERBANDINGAN EFISIENSI BOILER AWAL OPERASI DAN SETELAH OVERHAUL TERAKHIR DI UNIT 5 PLTU SURALAYA,” pp. 44–48.
- [4] A. Suardi, N. Chairat, F. Muhammad, T. B. Impak, and B. Tekuk, “PowerPlant,” no. 4, 2017.
- [5] F. Kreith and A. Prijono, *Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas*. 1997.
- [6] H. C. Hasibuan, F. H. Napitupulu, D. Teknik, M. Fakultas, T. Universitas, and S. Utara, “PENGUJIAN NILAI KALOR TERHADAP PERFORMANSI KETEL,” vol. 4, no. 4, 2013.
- [7] D. Jaelani, “Analisa Efisiensi Ketel Uap Pada Unit 2 Pltu 2 Banten Kapasitas 300 Mw,” no. April, pp. 25–32, 2017.
- [8] Y. Pravitasari, M. B. Malino, and M. Novitasari, “Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung,” *Prism. Fis.*, vol. V, no. 01, pp. 9–12, 2017.
- [9] Djokosetyardjo, M. J. 2003. “*Ketel Uap*”. Edisi Kelima. Penerbit PT. Pradnya Paramita. Jakarta
- [10] Muin A. Syamsir. 1988.”*Pesawat-Pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)*”. Edisi Pertama. Penerbit CV. Rajawali. Jakarta
- [11] Moran, *Michael J*, Saphiro, Howard N. *Termodinamika Teknik*, Jilid 2. Jakarta:Erlangga.2004
- [12] J.P. Holman, *Perpindahan Kalor*, Erlangga Ciracas, Jakarta. 1997.

LAMPIRAN

1. Interpolasi untuk nilai entalpi yang ada pada halaman 58 pada BAB IV

$$h_{sup} : P = 86 \text{ bar}, T = 489^\circ\text{C}, h = 3362.93 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 80 \text{ bar}, T = 489^\circ\text{C}$

T (°C)	h (kJ/kg)		
480	3348.4	$\frac{489-480}{520-480}$	$\frac{h-3348.4}{3447.7-3348.4}$
489	H		
520	3447.7	$H_{sup} = 3370.74 \text{ kJ/kg}$	

Interpolasi pada $P = 100 \text{ bar}, T = 489^\circ\text{C}$

T (°C)	h (kJ/kg)		
480	3321.4	$\frac{489-480}{520-480}$	$\frac{h-3321.4}{3425.1-3321.4}$
489	H		
520	3425.1	$h_{sup} = 3344.73 \text{ kJ/kg}$	

Interpolasi pada $P = 86 \text{ bar}$

P (bar)	h (kJ/kg)		
80	3370.74	$\frac{86-80}{100-80}$	$\frac{h-3370.74}{3344.73-3370.74}$
86	H		
100	3344.73	$h_{sup} = 3362.93 \text{ kJ/kg}$	

$$h_a : \text{entalpi air pengisi ketel uap } T = 181^\circ\text{C}$$

Interpolasi pada $T = 181^\circ\text{C}$

T (°C)	h (kJ/kg)		
180	763.22	$\frac{181-180}{190-180}$	$\frac{h-763.22}{807.62-763.22}$
181	H		
190	807.62	$h_a = 767.66 \text{ kJ/kg}$	

2. Interpolasi untuk nilai entalpi yang ada pada halaman 60 BAB IV

$$h_a : T = 181^\circ\text{C}, h_a = 767.66 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $T = 181^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$		
180	763.22	$\frac{181-180}{190-180}$	$\frac{h-763.22}{807.62-763.22}$
181	h		
190	807.62		

$h_a = 767.66 \text{ kJ/kg}$

3. Interpolasi untuk nilai entalpi yang ada pada halaman 61 BAB IV

$$h_{out} : T = 489^\circ\text{C}, P = 86 \text{ bar}, h_{out} = 3344.73 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 80 \text{ bar}, T = 489^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$		
480	3348.4	$\frac{489-480}{520-480}$	$\frac{h-3348.4}{3447.7-3348.4}$
489	H		
520	3447.7		

$h_{out} = 3370.74 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 100 \text{ bar}, T = 489^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$		
480	3321.4	$\frac{489-480}{520-480}$	$\frac{h-3321.4}{3425.1-3321.4}$
489	H		
520	3425.1		

$h_{out} = 3344.73 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 86 \text{ bar}$

$P \text{ (bar)}$	$h \text{ (kJ/kg)}$		
80	3370.74	$\frac{86-80}{100-80}$	$\frac{h-3370.74}{3344.73-3370.74}$
86	H		
100	3344.73		

$h_{out} = 3362.93 \text{ kJ/kg}$

$$h_{in} : T = 359^\circ\text{C}, P = 86 \text{ bar}, h_{in} = 2998.63 \text{ kJ/kg}$$

Interpolasi pada $P = 80 \text{ bar} = 359^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$359-320$	$h-2877.2$
320	2877.2	$360-320$	$3019.8-2877.2$
359	H		
360	3019.8		$h_{in} = 3016.23 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 100 \text{ bar} = 359^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$359-320$	$h-2781.3$
320	2781.3	$360-320$	$2962.1-2781.3$
359	H		
360	2962.1		$h_{in} = 2957.58 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 86 \text{ bar}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$86-80$	$h-3016.23$
80	3016.23	$100-80$	$2957.58-3016.23$
86	H		
100	2957.58		$h_{in} = 2998.63 \text{ kJ/kg}$

4. Interpolasi untuk nilai entalpi yang ada pada halaman 61 BAB IV

h_{out} : $T = 416^\circ\text{C}$, $P = 86 \text{ bar}$, $h = 3169.94 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 80 \text{ bar}$, $T = 416^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$416-400$	$h-3138.3$
400	3138.3	$440-400$	$3246.1-3138.3$
416	H		
440	3246.1		$h_{out} = 3181.42 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada $P = 100 \text{ bar}$, $T = 416^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C})$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$416-400$	$h-3096.5$
400	3096.5	$440-400$	$3213.2-3096.5$
416	H		
440	3213.2		$h_{out} = 3143.18 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada P = 86 bar

P (bar)	h (kJ/kg)	86-80	h-3181.42
80	3181.42	100-80	3143.18-3181.42
86	H		
100	3143.18		$h_{out} = 3169.94 \text{ kJ/kg}$

h_{in} : T = 341°C, P = 86 bar, h = 2929.30 kJ/kg

Interpolasi pada P = 80 bar, T = 341°C

T (°C)	h (kJ/kg)	341-320	h-2877.2
320	2877.2	360-320	3019.8-2877.2
341	H		
360	3019.8		$h_{in} = 2952.06 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada P = 100 bar = 359°C

T (°C)	h (kJ/kg)	341-320	h-2781.3
320	2781.3	360-320	2962.1-2781.3
341	H		
360	2962.1		$h_{in} = 2876.22 \text{ kJ/kg}$

Interpolasi pada 86 bar

P (bar)	h (kJ/kg)	86-80	h-2952.06
80	2952.06	100-80	2876.22-2952.06
86	h		
100	2876.22		$h_{in} = 2929.30 \text{ kJ/kg}$

5. Interpolasi untuk nilai $C_{p_{air}}$ yang ada pada halaman 62 BAB IV

$$C_{p_{air}} : T_r = \frac{181 - 118}{2} 149.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Interpolasi panas jenis pada $T_r = 422.5 \text{ K}$

$T(^{\circ}\text{C})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\frac{149.5-140}{150-140}$	$\frac{C_p-2.244}{2.314-2.244}$
140	2.244		
149.5	C_p		
150	2.314		

$C_p = 2.3105 \text{ kJ/kgK}$

6. Interpolasi untuk nilai $C_{p_{\text{udara}}}$ yang ada pada halaman 63 BAB IV

$$C_{p_{\text{udara}}} : T_r = \frac{140.55}{2} 97.5^{\circ}\text{C} = 370.5\text{K}$$

Interpolasi panas jenis pada $T = 370.5\text{K}$

$T(\text{K})$	$C_p(\text{kJ/kgK})$	$\frac{370.5-350}{400-350}$	$\frac{C_p-1.008}{1.013-1.008}$
350	1.008		
370.5	C_p		
400	1.013		

$C_{p_{\text{udara}}} = 1.01005 \text{ kJ/kgK}$

**Tabel pengamatan *Boiler* pada beban 20 MW
Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan**

Waktu	Kapasitas boiler (Ton/jam)			HTS _{in} (°C)			HTS _{out} (°C)		
	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019
09:00	90	90	91	360	355	360	490	485	490
10:00	90	90	91	360	355	360	490	485	490
11:00	90	90	91	360	355	360	490	485	490
12:00	90	90	91	360	355	360	490	485	490
13:00	90	90	91	360	355	360	490	485	490
14:00	90	90	91	360	360	360	490	490	490
15:00	90	90	91	360	360	360	490	490	490
16:00	90	90	91	360	360	360	490	490	490
rata-rata	90	90	91	360	356,88	360	490	486,88	490
rata-rata/hari		90,3			359			489	

Sumber: PT. PLN Sektor Pembangkitan Belawan

Waktu	HTS _{PressOut} (Bar)			LTS _{in} (°C)			LTS _{out} (°C)		
	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019
09:00	86	85	86	342	341	340	419	415	415
10:00	86	85	86	342	341	340	419	415	415
11:00	86	85	86	342	341	340	419	415	415
12:00	86	85	86	342	341	341	419	415	415
13:00	86	85	86	342	340	341	419	410	415
14:00	86	86	86	342	340	341	419	410	415
15:00	86	86	86	342	340	341	419	410	415
16:00	86	86	86	342	340	341	419	410	415
rata-rata	86	85,38	86	342	340,50	340,63	419	412,50	415
rata-rata/hari		86			341			416	

Sumber: PT. PLN Sektor Pembangkitan Belawan

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 10/25/19

Access From (repository.uma.ac.id)

**Tabel pengamatan Boiler pada beban 20 MW
Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan**

Waktu	Tin _{Eco} (°C)			Tout _{Eco} (°C)			Kapasitas Economizer (Ton/jam)		
	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019
09:00	118	118	118	181	180	181	95	95	98
10:00	118	118	118	181	180	181	95	95	98
11:00	118	118	118	181	180	181	95	93	97
12:00	118	118	118	181	180	181	95	93	97
13:00	118	118	118	181	180	181	95	93	98
14:00	118	118	118	181	180	181	95	95	98
15:00	118	118	118	181	180	180	95	95	98
16:00	118	118	118	181	180	180	95	95	98
rata-rata	118	118	118	181	180	180,75	95	94,25	97,75
rata-rata/hari		118			181			96	

Sumber: PT. PLN Sektor Pembangkitan Belawan

Waktu	TFGin _{AH} (°C)			TFGout _{AH} (°C)			Tin _{AH} (°C)		
	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019
09:00	320	320	320	120	120	118	54	52	54
10:00	320	320	320	120	120	118	54	54	54
11:00	320	320	320	120	120	118	54	55	54
12:00	320	320	320	120	120	118	54	56	56
13:00	320	320	320	121	120	118	55	56	56
14:00	320	320	320	121	120	118	55	55	56
15:00	320	320	320	121	120	120	56	55	56
16:00	320	320	320	121	120	120	56	55	56
rata-rata	320	320	320	120,50	120	118,50	54,75	54,75	55,25
rata-rata/hari		320			120			55	

Sumber: PT. PLN Sektor Pembangkitan Belawan

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 10/25/19

Access From (repository.uma.ac.id)

**Tabel pengamatan *Boiler* pada beban 20 MW
Unit 3 PLTU PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan**

Waktu	T _{outAH} (°C)			T _{Sat} (°C)		
	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019	13-05-2019	15-05-2019	17-05-2019
09:00	139	140	140	300	300	300
10:00	139	141	140	300	300	300
11:00	139	142	140	300	300	300
12:00	139	142	140	300	300	300
13:00	140	142	140	300	300	300
14:00	140	142	140	300	300	300
15:00	140	142	140	300	300	300
16:00	140	142	140	300	300	300
rata-rata	139,50	141,625	140	300	300	300
rata-rata/hari		140			300	

Sumber: PT. PLN Sektor Pembangkitan Belawan

SIKLUS PLTU UNIT 3 & 4 BELAWAN

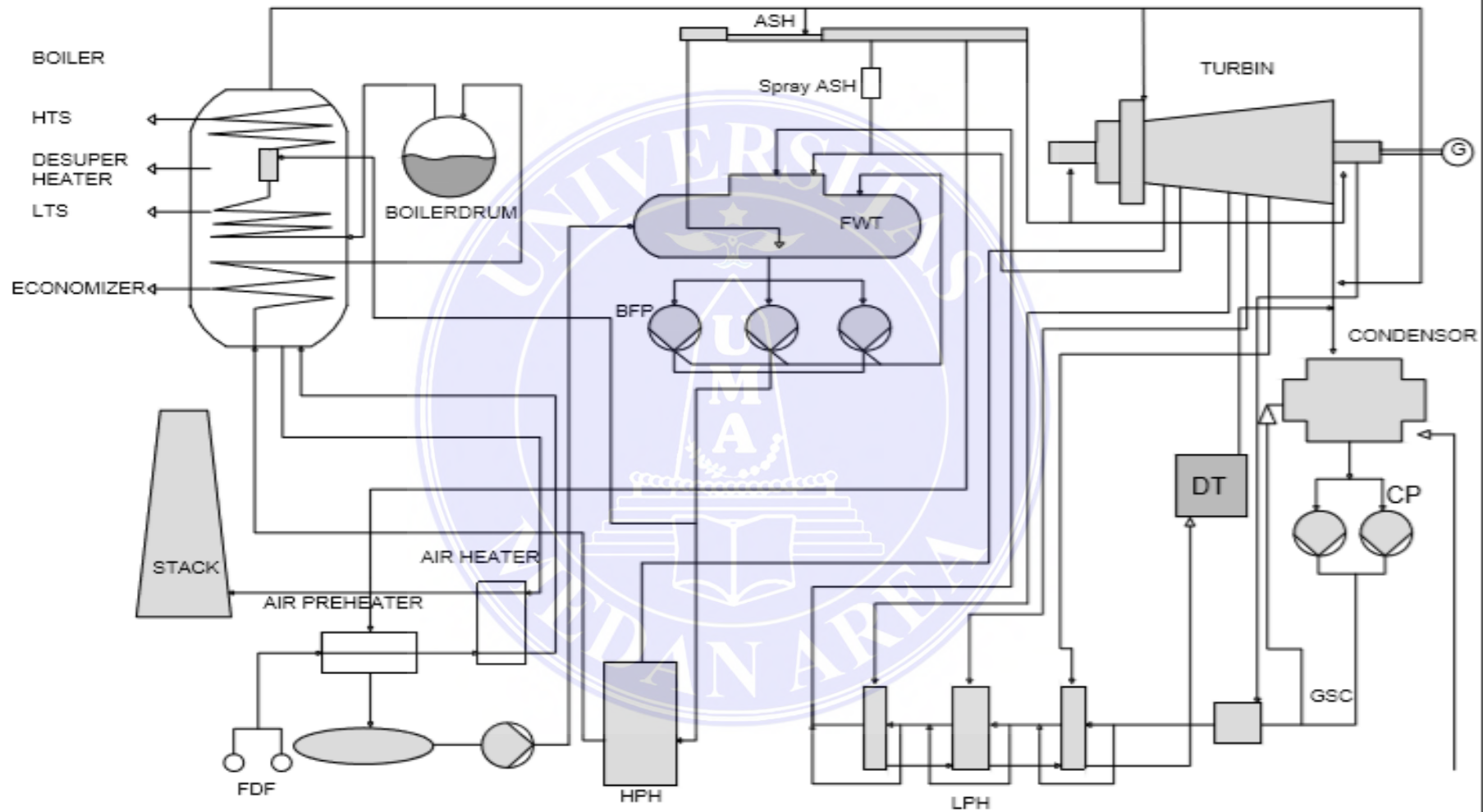


TABLE A-2

Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Pres. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

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

TABLE A-4

Properties of Superheated Water Vapor

T	v	u	h	s	v	u	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg · K
p = 40 bar = 4.0 MPa (T_{sat} = 250.48°C)								
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190
p = 80 bar = 8.0 MPa (T_{sat} = 295.068°C)								
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
p = 100 bar = 10.0 MPa (T_{sat} = 311.068°C)								
Sat.	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
320	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
360	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
400	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
440	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
480	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
520	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
560	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
600	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
640	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
700	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
740	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670
p = 120 bar = 12.0 MPa (T_{sat} = 324.758°C)								
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952
p = 140 bar = 14.0 MPa (T_{sat} = 336.758°C)								
Sat.	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

H₂O

TABLE A-20

Ideal Gas Specific Heats of Some Common Gases (kJ/kg · K)

Temp. K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp. K
	Air			Nitrogen, N ₂			Oxygen, O ₂			
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000
Temp. K	Carbon Dioxide, CO ₂			Carbon Monoxide, CO			Hydrogen, H ₂			Temp. K
250	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400	14.051	9.927	1.416	250
300	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399	14.307	10.183	1.405	300
350	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398	14.427	10.302	1.400	350
400	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395	14.476	10.352	1.398	400
450	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392	14.501	10.377	1.398	450
500	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387	14.513	10.389	1.397	500
550	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382	14.530	10.405	1.396	550
600	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376	14.546	10.422	1.396	600
650	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370	14.571	10.447	1.395	650
700	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364	14.604	10.480	1.394	700
750	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358	14.645	10.521	1.392	750
800	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353	14.695	10.570	1.390	800
900	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343	14.822	10.698	1.385	900
1000	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335	14.983	10.859	1.380	1000

Table A-20

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, as based on "Tables of Thermal Properties of Gases," NBS Circular 564, 1955.

TABLE A-8

Properties of saturated water

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Saturation Pressure P_{sat}, MPa	Density $\rho, \text{kg/m}^3$		Enthalpy of Vaporization $h_{fg}, \text{kJ/kg}$	Specific Heat $c_p, \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$		Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$		Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient $\beta, 1/\text{K}$
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-4}	0.922×10^{-4}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0060	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-4}	0.934×10^{-4}	11.2	1.00	-0.035×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-4}	0.946×10^{-4}	9.45	1.00	-0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0126	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-4}	0.959×10^{-4}	8.09	1.00	-0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-4}	0.973×10^{-4}	7.01	1.00	-0.199×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-4}	0.987×10^{-4}	6.14	1.00	-0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-4}	1.001×10^{-4}	5.47	1.00	-0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-4}	1.016×10^{-4}	4.83	1.00	-0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.663×10^{-4}	1.031×10^{-4}	4.32	1.00	-0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-4}	1.046×10^{-4}	3.91	1.00	-0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-4}	1.062×10^{-4}	3.55	1.00	-0.451×10^{-3}
55	15.76	986.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-4}	1.077×10^{-4}	3.25	1.00	-0.484×10^{-3}
60	19.94	984.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-4}	1.093×10^{-4}	2.99	1.00	-0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-4}	1.110×10^{-4}	2.75	1.00	-0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-4}	1.126×10^{-4}	2.55	1.00	-0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-4}	1.142×10^{-4}	2.38	1.00	-0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-4}	1.159×10^{-4}	2.22	1.00	-0.635×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-4}	1.176×10^{-4}	2.08	1.00	-0.670×10^{-3}
90	70.14	963.5	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-4}	1.193×10^{-4}	1.96	1.00	-0.702×10^{-3}
95	84.85	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297×10^{-4}	1.210×10^{-4}	1.85	1.00	-0.736×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5976	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282×10^{-4}	1.227×10^{-4}	1.75	1.00	-0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255×10^{-4}	1.263×10^{-4}	1.58	1.00	-0.798×10^{-3}
120	196.33	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.685	0.0275	0.232×10^{-4}	1.296×10^{-4}	1.44	1.00	-0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.688	0.0288	0.213×10^{-4}	1.330×10^{-4}	1.33	1.01	-0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.691	0.0301	0.197×10^{-4}	1.365×10^{-4}	1.24	1.02	-0.970×10^{-3}
150	475.8	910.6	2.546	2114	4311	2314	0.692	0.0316	0.183×10^{-4}	1.399×10^{-4}	1.16	1.02	-1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2400	0.690	0.0331	0.170×10^{-4}	1.434×10^{-4}	1.09	1.05	-1.145×10^{-3}
170	791.7	897.2	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160×10^{-4}	1.468×10^{-4}	1.03	1.05	-1.178×10^{-3}
180	1.0021	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150×10^{-4}	1.502×10^{-4}	0.983	1.07	-1.210×10^{-3}
190	1.2544	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142×10^{-4}	1.537×10^{-4}	0.947	1.09	-1.280×10^{-3}
200	1.5533	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134×10^{-4}	1.571×10^{-4}	0.910	1.11	-1.350×10^{-3}
220	2.318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122×10^{-4}	1.641×10^{-4}	0.865	1.15	-1.520×10^{-3}
240	3.344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111×10^{-4}	1.712×10^{-4}	0.836	1.24	-1.720×10^{-3}
260	4.698	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102×10^{-4}	1.798×10^{-4}	0.832	1.35	-2.000×10^{-3}
280	6.412	750.8	33.15	1544	5280	4830	0.581	0.0609	0.094×10^{-4}	1.870×10^{-4}	0.854	1.49	-2.380×10^{-3}
300	8.581	713.8	46.15	1405	5790	5980	0.548	0.0695	0.086×10^{-4}	1.965×10^{-4}	0.902	1.69	-2.950×10^{-3}
320	11.274	667.1	64.57	1239	6340	7900	0.509	0.0816	0.078×10^{-4}	2.084×10^{-4}	1.00	1.97	-
340	14.586	610.5	92.62	1038	6940	11,870	0.469	0.110	0.070×10^{-4}	2.265×10^{-4}	1.23	2.43	-
360	18.651	528.3	144.0	720	14,690	20,000	0.427	0.178	0.060×10^{-4}	2.571×10^{-4}	2.06	3.73	-
374.14	22,090	317.0	317.0	0	-	-	-	-	0.043×10^{-4}	4.313×10^{-4}	-	-	-

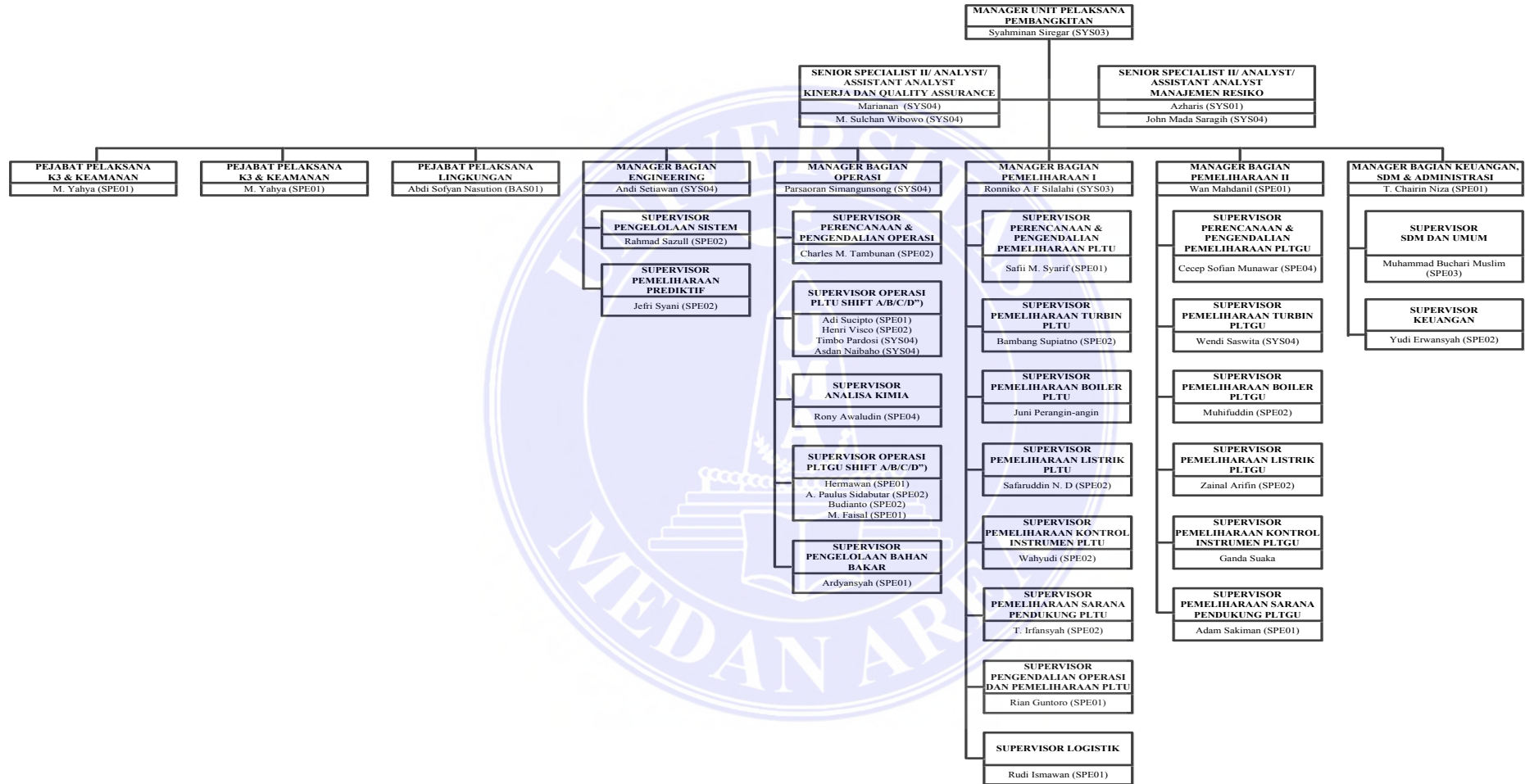
Note 1: Kinematic viscosity ν and thermal diffusivity α can be calculated from their definitions, $\nu = \mu/\rho$ and $\alpha = k/\rho c_p$. The temperatures 0.01°C, 100°C, and 374.14°C are the triple, boiling, and critical-point temperatures of water, respectively. The properties listed above (except the vapor density) can be used at any pressure with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Viscosity and thermal conductivity data are from J. V. Sengers and J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Other data are obtained from various sources or calculated.

Struktur Organisasi

PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan



Sumber: PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan



PT PLN (Persero)

UNIT INDUK PEMBANGKITAN SUMBAGUT

PLN UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN BELAWAN

Jl. P. Sicanang No. 1 Belawan - Medan 20416

Telepon : (061) 6941192, 6940559 (Hunting)

Facsimile : (061) 6941143

E-mail : contactplnsblw@pln.co.id

Website :

SURAT KETERANGAN

NOMOR: 087 SKI/MUM.00.01/UPKBLW/2019

Yang bertanda tangan dibawah ini atas nama Manager PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Sumatera Bagian Utara Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan menerangkan bahwa:

No	Nama	NIS/ NIM	Lembaga Pendidikan
1	Andreas Sinaga	15.813.0020	UNIVERSITAS MEDAN AREA
2	Kasno Nunut Simbolon	15.813.0024	UNIVERSITAS MEDAN AREA

adalah benar telah melaksanakan Riset di PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan Sumatera Bagian Utara Unit Pelaksana Pembangkitan Belawan pada tanggal 13 Mei 2019 Sampai dengan 17 Mei 2019 di bawah bimbingan Supervisor Pemeliharaan Boiler PLTU.

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Belawan, 19 Juli 2019

A.N. MANAGER
MANAGER BAGIAN KEUANGAN, SDM &
ADMINISTRASI


T. CHAIRIN NIZA