

EVALUASI KINERJA BOILER PLTU UNIT 1 JENEPONTO



SKRIPSI

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

M. IKHSAN MUIS	44215021
ELVI	44215008

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2019

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “Evaluasi Kinerja Boiler PLTU Unit 1 Jenepono” oleh **M. Ikhsan Muis** (44215021) dan **Elvi** (44215008) telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar,

Pembimbing I



Ir. La Ode Musa, M.T.
NIP. 19601231 199003 1 021

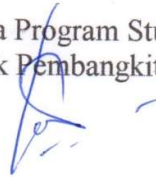
Pembimbing II



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

Mengetahui,

Ketua Program Studi
D4-Teknik Pembangkit Energi



Ir. La Ode Musa, M.T.
NIP. 19601231 199003 1 021

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini Rabu tanggal 11 September 2019, tim penguji ujian sidang skripsi telah menerima skripsi mahasiswa atas nama **M. Ikhsan Muis** (44215021) dan **Elvi** (44215008) dengan judul “Evaluasi Kinerja Boiler PLTU Unit 1 Jeneponto”

Makassar,

Tim Penguji Ujian Sidang Skripsi:

- | | | |
|------------------------------------|---------------|---------|
| 1. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D. | Ketua | (.....) |
| 2. Gusri Emiyati Ali, S.Pd., M.Pd. | Sekretaris | (.....) |
| 3. Musrady Mulyadi, S.ST., M.T. | Anggota | (.....) |
| 4. Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D | Anggota | (.....) |
| 5. Ir. La Ode Musa, M.T. | Pembimbing I | (.....) |
| 6. Abdul Rahman, S.T., M.T. | Pembimbing II | (.....) |

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas karunia dan kemudahan yang telah diberikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka melengkapi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta atas dukungan doa dan kasih sayang, serta materinya yang tak terhingga nilainya
2. Bapak Prof. Ir. Muhammad Anshar M.Si., P.hD. selaku direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang
3. Bapak Dr. Jamal S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang
4. Bapak Ir. La Ode Musa M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang dan sekaligus sebagai pembimbing I yang telah mencurahkan perhatian dan kesempatan untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Bapak Abdul Rahman, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah mencurahkan perhatian dan kesempatan untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Para Dosen dan Staf Politeknik Negeri Ujung Pandang yang tidak disebutkan namanya satu persatu atas torehan ilmunya kepada penulis.

7. Rekan – rekan sesama mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya kelas IV Teknik Pembangkit Energi angkatan 2015.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini dan demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembacanya.



Makassar,

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENERIMAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
SURAT PERNYATAAN	xi
RINGKASAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.4 Tujuan dan Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Teori Dasar	7
2.1.1 Pengertian Boiler	7
2.1.2 Siklus Rankine	8
2.1.3 Proses Kerja Boiler	10
2.1.4 Bagian-Bagian Boiler	12
2.1.5 Jenis-Jenis Boiler	17
2.1.6 Boiler <i>Pulverized</i>	21
2.1.7 Perpindahan Panas Pada Boiler	22
2.1.8 Batubara	24

2.2 Evaluasi Kinerja Boiler	26
2.2.1 Neraca Kalor	26
2.2.2 Efisiensi Boiler	29
2.3 Analisa Gas Asap	35
2.4 Boiler <i>Pulverized</i> PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1	36
2.5 Penelitian yang Relevan	37
BAB III METODE PENELITIAN	40
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	40
3.2 Alat Penelitian	40
3.3 Prosedur Penelitian	41
3.4 Teknik Pengumpulan Data	43
3.5 Teknik Analisis Data	43
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Analisis Efisiensi Boiler	45
4.1.1 Kondisi Operasi saat Komisioning Tahun 2012	45
4.1.2 Kondisi Operasi Tanggal 5 Agustus 2018 pada Beban 100 MW	45
4.1.3 Kondisi Operasi Tanggal 22 Februari 2019 pada Beban 100 MW	51
4.2 Pembahasan	58
4.2.1 Metode Langsung	58
4.2.2 Metode Tidak Langsung	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Boiler	7
Gambar 2.2 Siklus Rankine dengan Pemanas Ulang	9
Gambar 2.3 Proses Kerja pada Boiler	10
Gambar 2.4 <i>Fire Tube Boiler</i>	18
Gambar 2.5 <i>Water Tube Boiler</i>	18
Gambar 2.6 Boiler Paket	19
Gambar 2.7 <i>Pulverizer Coal Fire Boiler</i>	22
Gambar 2.8 Diagram Neraca Energi Boiler	27
Gambar 2.9 Kehilangan Panas Pada Boiler	28
Gambar 3.1 Letak kehilangan panas pada boiler dengan metode tidak langsung	44
Gambar 4.1 Diagram Kehilangan panas yang terjadi pada boiler unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi 5 Agustus 2018 pada beban 100 MW	51
Gambar 4.2 Diagram Kehilangan panas yang terjadi pada boiler unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW	57
Gambar 4.3 Grafik perbandingan efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto menggunakan metode langsung pada saat komisioning dengan kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW	58
Gambar 4.4 Grafik perbandingan persentase kehilangan panas boiler unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW	59
Gambar 4.5 Grafik perbandingan efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto menggunakan metode tidak langsung pada saat komisioning dengan kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW	60

DAFTAR SIMBOL

No.	Keterangan	Satuan
1.	Q = Jumlah uap yang dihasilkan per jam	ton/jam
2.	q = Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam	ton/jam
3.	h_s = Entalpi uap jenuh	kkal/kg
4.	h_f = Entalpi air umpan	kkal/kg
5.	GCV = Nilai panas kotor bahan bakar	kkal/kg
6.	T_g = Temperatur gas buang	$^{\circ}\text{C}$
7.	T_a = Temperatur udara sekitar	$^{\circ}\text{C}$
8.	m = Massa gas buang kering	kg/kg bb
9.	C_{pg} = Panas jenis gas buang	kkal/kg
10.	C_{ps} = Panas jenis uap lewat jenuh	kkal/kg
11.	MF = Persentasi kadar air dalam 1 kg bahan bakar	%
12.	C = Karbon	%
13.	H = Hidrogen	%
14.	N = Nitrogen	%
15.	S = Sulfur	%
16.	O = Oksigen	%
17.	η = Efisiensi	%
18.	P_s = Tekanan uap	MPa
19.	T_s = Temperatur uap	$^{\circ}\text{C}$

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Penelitian	69
Lampiran 2 Tabel Uap.....	73
Lampiran 3 <i>Boiler Overview</i>	76
Lampiran 4 <i>Main, Reheat and Bypass System</i>	77
Lampiran 5 <i>Plant View of Main Building</i>	78
Lampiran 6 Hasil Perhitungan Efisiensi Termal saat Komisioning	79
Lampiran 7 Proses Pengambilan Data	81
Lampiran 8 Surat Keterangan Telah Melaksanakan Pengambilan Data	83



SURAT PERNYATAAN

Kami yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : M. Ikhsan Muis/Elvi

NIM : 44215021/44215008

Menyatakan dengan sebenar-sebenarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul “Evaluasi Kinerja Boiler PLTU Unit 1 Jeneponto” merupakan gagasan dan hasil karya kami sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apa pun pada perguruan tinggi dan instansi mana pun.

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

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


Elvi
NIM. 44215008

Makassar,

M. Ikhsan Muis
NIM. 44215021

EVALUASI KINERJA BOILER PLTU UNIT 1 JENEPONTO

RINGKASAN

Bagian utama sistem PLTU yang memiliki peran yang sangat krusial dalam konversi energi adalah Boiler. Salah-satu tipe boiler yaitu tipe *Pulverized*. Boiler digunakan untuk memanaskan air sehingga menjadi uap. Panas yang diperoleh berasal dari pembakaran batubara. Namun, tidak semua panas dapat ditransfer kepada boiler, terdapat beberapa kerugian panas (*heat loss*). Kondisi boiler yang sudah digunakan beberapa tahun pasti memiliki dampak pada efisiensinya, terlebih jika operasional dan perawatan yang kurang baik maka efisiensi boiler dapat jauh menurun. Efisiensi boiler yang menurun adalah permasalahan serius yang harus diperhatikan bila tidak ingin proses produksi terganggu. Terdapat dua metode pengkajian efisiensi boiler yaitu metode langsung atau metode *input-output* dan metode kehilangan panas atau *heat loss*.

Penelitian ini bertujuan menghitung efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto dari saat komisioning dan saat sekarang dengan metode langsung dan metode tidak langsung. Data yang digunakan berupa data *input/output* boiler dan data analisis batubara.

Berdasarkan hasil penelitian, dengan metode langsung efisiensi boiler Unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan tanggal 22 Februari 2019 masing-masing adalah sebesar 73,24% dan 70,40%. Dengan metode tidak langsung, efisiensi boiler Unit 1 PLTU Jeneponto mengalami penurunan. Efisiensi boiler saat komisioning adalah sebesar 92,27%, sedangkan pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan tanggal 22 Februari 2019 masing-masing adalah sebesar 86,57% dan 85,48%. Nilai kehilangan panas pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan 22 Februari 2019 yang pertama adalah kandungan hidrogen dalam batubara (L_H) masing-masing adalah sebesar 4,47% dan 4,84%. Kehilangan panas kedua yaitu penguapan air dalam bahan bakar (L_{mf}) masing-masing adalah sebesar 4,41% dan 4,77%. Kehilangan panas ketiga yaitu disebabkan karena gas buang yang kering (L_{dg}) masing-masing adalah sebesar 2,94% dan 3,27%. Kehilangan panas keempat yaitu disebabkan karena kandungan air dalam udara (L_{mf}) masing-masing adalah sebesar 0,11% dan 0,13%. Kehilangan panas kelima yaitu disebabkan karena kehilangan panas yang tidak terhitung (L_{uc}) masing-masing adalah sebesar 1,5%.

Kata Kunci : Efisiensi, Boiler, Kehilangan Panas

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi memiliki peran yang sangat krusial untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari baik itu untuk kebutuhan rumah tangga, sarana umum atau pun industri. Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan sebagai dampak dari pertumbuhan ekonomi dan pertambahan jumlah penduduk. Laju pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi dan perekonomian nasional yang berkembang dengan pesat menyebabkan pemenuhan pasokan energi menjadi sangat penting untuk mendapatkan perhatian. Indonesia adalah negara dengan jumlah penduduk terbesar di kawasan Asia Tenggara, dan terbesar ke empat di dunia setelah China, India dan Amerika Serikat. Diperkirakan kebutuhan energi nasional akan mencapai 238,8 MTOE pada tahun 2025. Kebutuhan pada tahun 2025 tersebut menunjukkan peningkatan sekitar 1,8 kali lipat dengan rata-rata pertumbuhan tahunan sebesar 6,4% dibandingkan dengan konsumsi energi final pada tahun 2015 (128,8 MTOE). Kebutuhan energi final akan semakin meningkat dan mencapai 682,3 MTOE pada tahun 2050. Rata-rata pertumbuhan kebutuhan energi selama periode 2015-2050 adalah sekitar 4,9% per tahun (DEN, 2016).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar. Bagian utama sistem PLTU yang memiliki peran yang sangat krusial dalam konversi energi adalah Boiler. Boiler digunakan untuk memanaskan air sehingga menjadi uap. Panas yang diperoleh berasal dari pembakaran batubara. Namun, tidak semua panas dapat ditransfer ke boiler dikarenakan terdapat beberapa kerugian panas (*heat loss*). Sebagian besar

kerugian-kerugian kalor disebabkan oleh karena adanya bagian-bagian boiler yang tidak dalam kondisi optimal, baik itu karena operasional yang tidak baik, perawatan yang kurang dan lain-lain, sehingga efisiensi boiler menjadi menurun.

Kehilangan kalor (*heat loss*) pada boiler sering terjadi karena banyaknya kemungkinan kehilangan panas pembakaran seperti panas yang terbawa keluar oleh gas buang tanpa uap air (*dry flue gas loss*), panas yang terbawa keluar oleh uap air panas, termasuk panas *sensible* dan *latent*, komponen bahan bakar yang tidak terbakar dan produk pembakaran tidak sempurna termasuk *solid ash combustible* dan CO dalam gas buang kehilangan panas dari dinding boiler melalui isolasi (radiasi dan konveksi), panas yang terbawa keluar bersama *blowdown*. Kehilangan panas pembakaran tersebut yang disebut dengan rugi-rugi panas.

Peningkatan pemanfaatan energi secara lebih efisien dan penekanan peningkatan biaya produksi terhadap konsumsi bahan bakar perlu dilakukan. Oleh karena itu kajian mengenai peningkatan kinerja boiler merupakan aspek penting karena berkontribusi terhadap penggunaan bahan bakar. Operasional boiler membutuhkan bahan bakar yang cukup banyak, sehingga biaya yang dikeluarkan untuk pembelian bahan bakar tersebut menjadi sangat tinggi. Usaha-usaha penghematan biaya operasional perlu dilakukan untuk meminimalkan pengeluaran.

Tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat dapat dikatakan sebagai efisiensi. Efisiensi boiler yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel dengan masukan

energi kimia dari bahan bakar merupakan penjabaran dari efisiensi boiler. Efisiensi boiler berkisar antara 70% hingga 90% (Dewata et al, 2011).

Kondisi boiler yang sudah digunakan beberapa tahun pasti memiliki dampak pada efisiensinya, terlebih jika operasional dan perawatan yang kurang baik maka efisiensi boiler dapat jauh menurun. Efisiensi boiler yang menurun adalah permasalahan serius yang harus diperhatikan bila tidak ingin proses produksi terganggu. Turunnya efisiensi boiler akan memberi dampak terhadap penurunan kinerja keseluruhan unit yang tidak mampu lagi menghasilkan daya sebesar pada saat komisioning. Efisiensi boiler yang tidak baik dapat mempengaruhi produksi listrik yang dihasilkan, karena uap hasil produksi dari unit boiler kemudian akan digunakan untuk membangkitkan daya listrik dengan bantuan generator. Oleh karena itu perlu adanya evaluasi kinerja boiler. Hasil analisis yang didapat nantinya diharapkan dapat ditindak lanjut yang berdampak pada peningkatan kinerja boiler.

Salah satu unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Jeneponto Unit 1 yang dimiliki PT. Bosowa Energi. Berlokasi di Desa Punagaya, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto ± 8 km dari jalan poros Takalar-Jeneponto atau sekitar 27 km dari kota Jeneponto dan 71 km dari kota Makassar, Sulawesi Selatan. PLTU Jeneponto unit 1 menggunakan boiler tipe *Pulverized Combustion* dan batubara dijadikan bubuk halus menggunakan *mill* sebelum diumpankan ke boiler. Jenis boiler yang digunakan tersebut memiliki beberapa kelebihan diantaranya dapat menggunakan berbagai jenis nilai kalor batubara, efisiensi yang tinggi dan fleksibel dalam perubahan

beban. Terdapat beberapa jenis batubara yang digunakan sebagai bahan bakar pada boiler tersebut, antara lain bituminus, sub-bituminus dan lignit dengan GCV antara 4.300-6.800 kkal/kg. Boiler PLTU Jenepono Unit 1 memiliki daya terpasang sebesar 125 MW yang ter-interkoneksi dengan jaringan SUTT PLN Sulselrabar 150 kV.

PLTU Jenepono sendiri mulai beroperasi pada tahun 2012, tetapi selama beroperasinya boiler PLTU Jenepono unit 1 mengalami beberapa masalah, antara lain *over temperature*, tekanan boiler yang rendah, dan batubara lembab yang dapat mempengaruhi proses pembakaran yang selanjutnya berdampak kepada efisiensi boiler. Bahkan untuk boiler baru sekalipun permasalahan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas pemeliharaan menjadi faktor menurunnya efisiensi boiler (UNEP, 2008). Oleh karena itu dipandang perlu untuk dilakukan evaluasi tentang kinerja boiler di PLTU Jenepono unit 1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat ditindak lanjut untuk peningkatan efisiensi boiler di PLTU Jenepono unit 1.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang terdapat beberapa masalah yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana efisiensi boiler di PLTU Jenepono unit 1 dengan metode langsung?
2. Bagaimana perbandingan efisiensi boiler PLTU Jenepono unit 1 saat komisioning dan saat sekarang dengan metode tidak langsung?

3. Bagaimana nilai kehilangan panas yang berpengaruh terhadap efisiensi boiler dengan metode tidak langsung di PLTU Jeneponto unit 1?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Evaluasi kinerja boiler serta penyelesaian teoritisnya akan mempunyai cakupan yang sangat luas dan kompleks. Oleh karena itu dalam penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

- a. Pengkajian hanya membahas analisis kinerja boiler dengan data panas masuk dan panas keluar dari sistem boiler yang digunakan dalam persamaan metode langsung.
- b. Data analisis batubara digunakan dalam persamaan metode tidak langsung.
- c. Data-data yang diperlukan diperoleh dari PLTU Jeneponto unit 1

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Sesuai dengan latar belakang dan rumusan masalah diatas, maka tujuan dan manfaat yang akan dicapai dari kegiatan penelitian ini adalah:

1. Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dari kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Untuk mengetahui efisiensi boiler dengan metode langsung
- b. Untuk mengetahui perbandingan nilai efisiensi boiler saat komisioning dan saat sekarang.
- c. Untuk mendapatkan nilai kehilangan panas pada boiler dengan metode tidak langsung

2. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Nilai efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung dan tidak langsung dapat dijadikan informasi untuk melakukan tindakan perbaikan pada boiler.
- b. Nilai berbagai kehilangan panas dengan metode tidak langsung dapat dijadikan informasi untuk melakukan tindakan perbaikan pada boiler.
- c. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

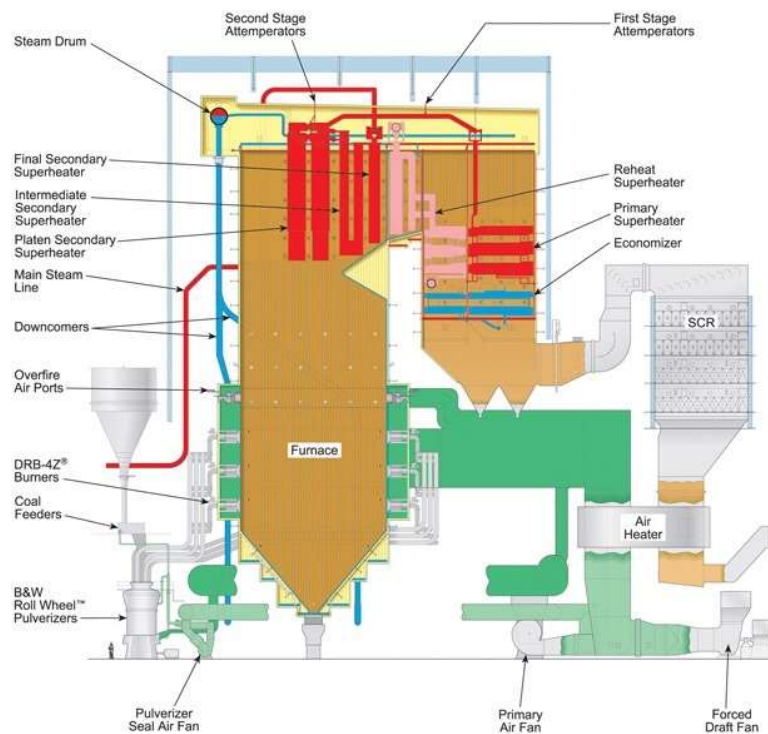


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Dasar

2.1.1 Pengertian Boiler

Boiler merupakan mesin kalor (*thermal engine*) yang mentransfer energi-energi kimia menjadi kerja (usaha). Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan uap. Uap diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air dididihkan sampai menjadi uap, volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali, menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan baik (UNEP, 2008).



Gambar 2.1 Sistem Boiler
Sumber: Denny, 2013

Sistem boiler terdiri dari:

- a. Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan uap.
- b. Sistem uap (*steam system*) mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Uap dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Tekanan uap diatur menggunakan katup dan dipantau dengan alat pemantau tekanan.
- c. Sistem bahan bakar (*fuel system*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Air yang disuplai ke boiler untuk diubah menjadi uap disebut air umpan (*feed water*). Dua sumber air umpan adalah:

- a. Kondensat atau uap yang mengembun yang dikembalikan dari proses.
- b. Air *makeup* (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan *plant* proses.

Sistem lain adalah penggunaan *economizer* untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang, untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi.

2.1.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus standar untuk pembangkit daya yang menggunakan tenaga uap. Siklus Rankine nyata yang digunakan dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dibandingkan siklus Rankine ideal asli yang

sederhana. Siklus Rankine juga disebut siklus uap-cair, siklus ini biasanya digambarkan pada kedua diagram, yaitu P-V dan T-S dengan garis-garis yang menunjukkan uap jenuh dan cair jenuh. Siklus Rankine mempunyai siklus termodinamika sebagai berikut:

1-2 = Kompresi secara isentropis (terjadi di pompa)

2-3 = Penambahan panas secara isobarik (terjadi di boiler)

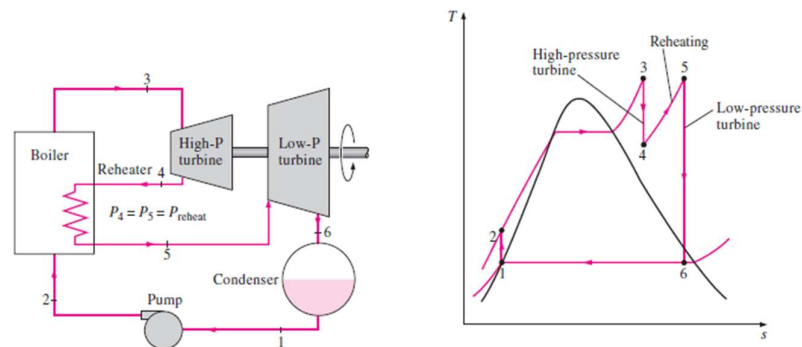
3-4 = Ekspansi secara isentropis (terjadi di turbin)

4-5 = Pemanasan ulang uap dari HP Turbine (terjadi di reheat)

5-6 = Ekspansi isentropis menuju LP Turbine (terjadi di turbin)

6-1 = Melepas panas secara isobarik (terjadi di kondensor)

(Cengel dan Boles, 2006).



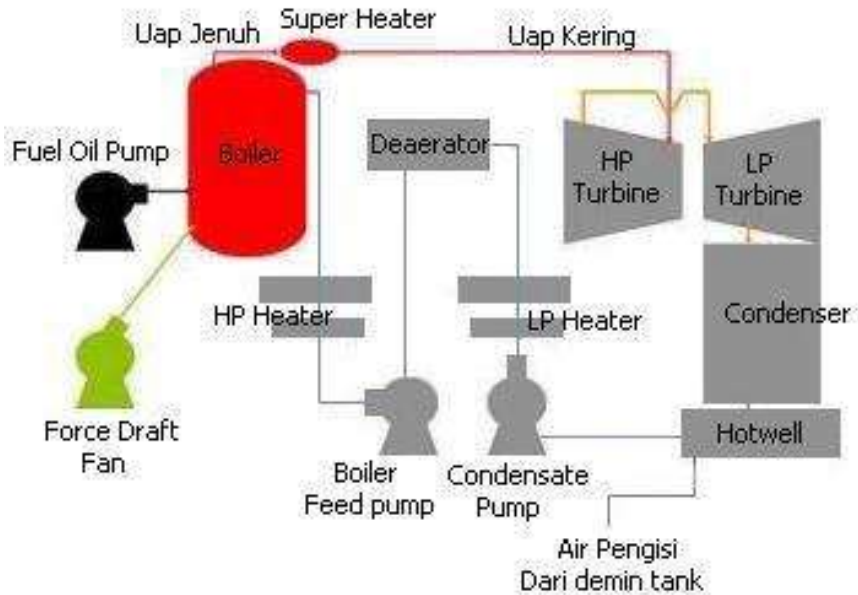
Gambar 2.2 Siklus Rankine dengan Pemanas Ulang

Sumber : Cengel dan Boles, 2006

Berdasarkan Gambar 2.2 tentang diagram siklus Rankine menunjukkan suatu proses aliran yang sederhana, dimana uap yang dihasilkan oleh boiler dibutuhkan oleh turbin untuk menghasilkan usaha. Siklus Rankine bekerja dengan cara mengubah panas menjadi kerja. Panas yang dihasilkan dari luar dengan aliran tertutup. Turbin memproduksi daya yang lebih besar dari yang dibutuhkan oleh

pompa dan *output* daya bersih sama dengan selisih antara kecepatan *input* panas dalam boiler dan kecepatan penolakan panas dalam kondensor (Asmudi, 2010).

2.1.3 Proses Kerja Boiler



Gambar 2.3 Proses Kerja Pada Boiler
Sumber : Nurmalita, 2012

Bahan akar batubara dari *coal bunker* dialirkan oleh *coal feeder* menuju *mill*. Di dalam *mill* batubara tersebut di giling sampai halus menjadi serbuk batubara. Udara panas (*primary air*) dialirkan oleh *primary air fan* (PAF) ke dalam *mill* untuk memanasi dan membawa serbuk batubara menuju *burner*. *Burner* digunakan untuk menyemburkan serbuk batubara ke dalam ruang bakar boiler. Udara untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna dipenuhi oleh udara sekunder yang diambil dari udara luar oleh *force draft fan* (FDF) dengan dipanasi terlebih dahulu didalam *air heater* menggunakan gas buang boiler. Panas

api di dalam ruang bakar boiler diserap secara radiasi oleh pipa-pipa evaporator yang tersusun membentuk dinding ruang bakar. Pipa-pipa evaporator tersebut dialiri air sehingga panas dari pipa diserap oleh air yang mengalir didalamnya, sehingga air berubah wujud menjadi uap jenuh dan ditampung di dalam *drum boiler*. Didalam *drum boiler* uap terpisah dengan air. Air tersebut dialirkan menuju *header* bawah evaporator bersama dengan air yang berasal dari *economiser* dengan melalui pipa *down comer*. Uap jenuh dari *drum boiler* selanjutnya dialirkan didalam pipa-pipa *superheater* untuk dinaikkan temperaturnya menjadi uap *superheated* dengan menggunakan panas dari gas buang boiler yang mengalir diluar pipa-pipa *superheater*.

Uap *superheated* yang dibangkitkan dalam sistem boiler memiliki nilai tekanan, temperatur dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan uap yang akan digunakan. Berdasarkan ketiga hal tersebut sistem boiler mengenal keadaan tekanan-temperatur rendah (*low pressure/LP*) dan tekanan-temperatur tinggi (*high pressure/HP*), dengan perbedaan itu pemanfaatan uap yang keluar dari sistem boiler dimanfaatkan dalam suatu proses untuk memanaskan cairan dan menjalankan suatu mesin (*commercial and industrial boilers*) atau membangkitkan energi listrik dengan mengubah energi kalor menjadi energi mekanik kemudian memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Namun, ada juga yang menggabungkan kedua sistem boiler tersebut, yang memanfaatkan tekanan-temperatur tinggi untuk membangkitkan energi listrik, kemudian sisa uap dari turbin dengan keadaan tekanan-temperatur rendah dapat dimanfaatkan ke dalam proses industri dengan bantuan *heat recovery boiler*.

Sistem boiler terdiri dari sistem air umpan, sistem uap dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan uap. Berbagai katup disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan dari sistem air umpan, penanganan air umpan diperlukan sebagai bentuk pemeliharaan untuk mencegah terjadi kerusakan dari sistem uap. Sistem uap mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Uap dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Tekanan uap diatur menggunakan katup dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem (Arham dan Yusuf, 2015).

2.1.4 Bagian-Bagian Boiler

a. Bagian Utama

1) *Furnace*

Komponen ini merupakan tempat pembakaran bahan bakar. Beberapa bagian dari *furnace* diantaranya: *refractory*, ruang perapian, *burner*, *exhaust for flue gas*, *charge and discharge door*.

2) *Drum Boiler*

Drum boiler berfungsi untuk menampung dan mengontrol kebutuhan air di boiler. Fungsi lain yang tidak kalah pentingnya adalah memisahkan uap dan air. Pengontrolan dilakukan pada kebutuhan air boiler untuk menjaga

level air di *drum* agar selalu konstan pada level normalnya. Uap didalam boiler dipisahkan melalui *separator cyclone*.

3) *Down Comer*

Adalah pipa yang berasal dari *steam drum* berfungsi untuk mengalirkan air pengisi ke bawah menuju *bottom header* untuk proses pemanasan air. Arah aliran pipa yang mengarah kebawah sehingga dinamakan *down comer*.

4) *Bottom Header*

Bottom header merupakan tempat penampung air yang turun dari *down comer*. Di *bottom header* air mendapatkan pemanasan melalui radiasi pipa-pipa pemanas. *Bottom header* berfungsi mendistribusikan air ke *tube-tube* atau pipa pemanas yaitu *Riser*

5) *Wall Tube/Riser*

Wall Tube/Riser adalah pipa uap yang tersusun secara vertikal dari *bottom header* menuju *drum boiler*. *Wall Tube/Riser* berfungsi sebagai media tempat untuk memanaskan air menjadi uap.

6) *Superheater*

Superheater merupakan alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheat vapour*). Uap panas lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi di dalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan. Terjadinya pukulan balik atau *back stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap

belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi. *Superheater* ditempatkan pada daerah aliran gas asap yang bertemperatur tinggi.

Superheater memproduksi *superheated steam* atau uap kering. Uap air ini menyimpan lebih banyak energi panas daripada uap air *saturated* (uap air basah), ditandai dengan nilai entalpi yang lebih tinggi. Uap air yang diproduksi oleh boiler konvensional umumnya hanya mencapai fase *saturated*, dan pada boiler *superheater* uap air *saturated* ini akan dipanaskan lebih lanjut mencapai fase *superheated*. Selain menyimpan energi panas yang lebih besar, uap air *superheater* juga menghilangkan sifat basah dari uap *saturated* sehingga tidak akan terjadi kondensasi yang terlalu cepat di dalam mesin yang menggunakan uap air tersebut.

7) *Air Heater*

Air heater adalah suatu alat yang digunakan untuk memanaskan udara pembakaran sebelum masuk ke ruang bakar (*furnace*). Alat ini tersusun dari pipa-pipa kecil yang didalamnya dilewati udara bertekanan, sama seperti *economizer* kalor yang diterima oleh *air heater* diambil dari gas buang dari pembakaran di *furnace*, suhu gas buang yang melewati *air heater* berkisar antara 140–190°C.

8) *Reheater*

Fungsi *reheater* untuk memanaskan uap yang keluar dari turbin yang memiliki tekanan tinggi dengan suhu 540°C. Adanya *reheater* memudahkan boiler untuk mengendalikan temperatur proses pembakaran.

Uap yang keluar dari turbin tidak kehilangan panas yang cukup tinggi karena mendapatkan perlakuan panas dari *reheater*, sehingga panas yang terbangun tidak banyak.

9) *Economizer*

Economizer adalah alat yang digunakan untuk memanaskan air pengisi/air umpan yang digunakan untuk menghasilkan uap sebelum dialirkan ke *steam drum*. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan air pengisi yang suhunya tidak jauh berbeda dengan air yang terdapat pada *steam drum*, serta untuk menaikkan efisiensi boiler. Kalor yang diterima oleh *Economizer* diambil dari gas buang pembakaran di *furnace* yang suhunya antara 470–490°C, sedangkan air pengisi setelah mengalami pemanasan di *economizer* memiliki suhu antara 200–300°C.

b. Bagian Pendukung

1) *Soot Blower*

Soot Blower berfungsi membersihkan abu atau jelaga yang menempel pada bagian boiler yang dilewati gas buang, hasil reaksi pembakaran bahan bakar dan udara selain api dan gas panas adalah abu dan jelaga, abu ini terbawa gas dan menempel pada pipa-pipa saluran yang dilewati gas buang sehingga menimbulkan *slaging* dan *fouling* (pengotoran).

2) *Forced Draft Fan* (FDF)

Force Draft Fan berfungsi sebagai pemasok udara pembakaran, dimana udara ini diambil dari atmosfer kemudian dialirkan ke *air heater*.

3) *Electrostatic Precipitator* (ESP)

Electrostatic Precipitator berfungsi untuk menangkap abu dan debu yang terbawa dalam gas hasil pembakaran sebelum dibuang ke atmosfer.

4) *Induced draft fan* (IDF)

Induced Draft Fan berfungsi untuk menghisap gas dan membuang ke atmosfer melalui cerobong. IDF juga berfungsi mengontrol tekanan ruang bakar agar selalu sedikit vakum.

5) *Coal Bunker*

Coal Bunker berfungsi sebagai alat penampungan batu bara sebelum melalui proses *grinding*.

6) *Coal Feeder*

Coal Feeder berfungsi untuk mengatur jumlah batubara yang akan masuk ke dalam *coal mill* (*pulverizer*).

7) *Coal Mill*

Ukuran batubara yang terlalu besar dapat mengurangi efisiensi proses pembakaran, karena semakin kecil ukuran partikel batubara maka akan semakin cepat pula batubara tersebut terbakar. *Coal mill* berfungsi untuk menggerus batubara sehingga menjadi bubuk (*pulverized fuel*), batubara keluaran *pulverizer* akan berukuran 200 MESH atau 75 μm . Sedang untuk membawa bubuk batubara ke *furnace*, dihembuskan udara primer ke *mill*. Udara primer dihasilkan oleh *primary air fan* (PAF) dan dipanaskan pada *Air Preheater* sehingga cukup untuk mengeringkan bubuk batubara.

Selanjutnya batubara yang sudah digiling di tiap *Mill* akan didorong oleh *primary air* ke *Burner* melalui *coal pipe*.

8) *Primary Air Fan* (PAF)

Primary Air Fan Berfungsi menghembuskan udara primer ke *mill* untuk membawa bubuk batubara ke *burner*, dipanaskan pada air *preheater* sehingga cukup untuk mengeringkan bubuk batubara.

9) *Seal Air Fan* (SAF)

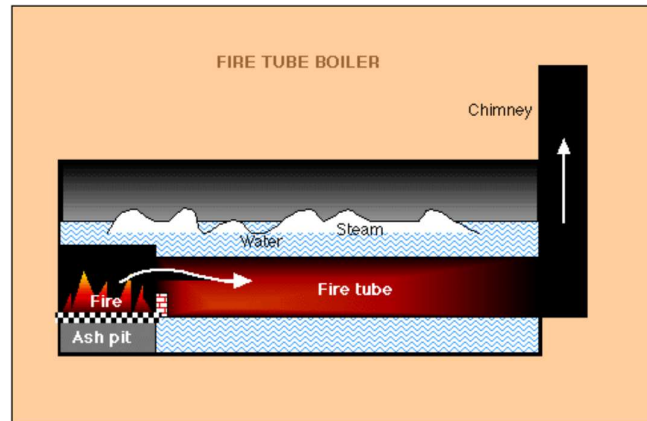
Seal Air Fan yaitu alat yang berfungsi menghasilkan udara perapat yang digunakan pada *Mill Pulverizer* dan *akses* udara pada boiler (PLTU Jenepono Unit 1).

2.1.5 Jenis-Jenis Boiler

Berikut ini adalah jenis-jenis boiler :

1. *Fire Tube Boiler*

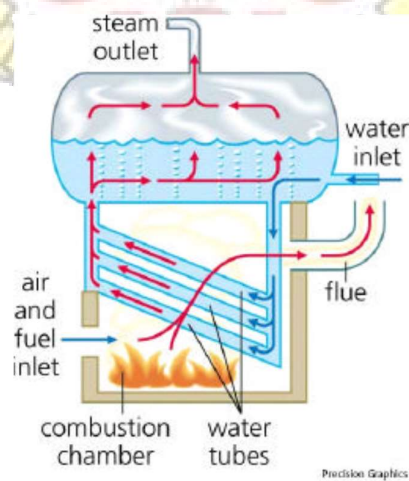
Pada *Fire Tube Boiler*, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk diubah menjadi uap. *Fire Tube Boiler* biasanya digunakan untuk kapasitas uap yang relatif kecil dengan tekanan uap rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, *fire tube boiler* kompetitif untuk kecepatan uap sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire Tube Boiler* dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya (UNEP,2008).



Gambar 2.3 *Fire Tube Boiler*
Sumber : UNEP, 2008

2. *Water Tube Boiler*

Pada *Water Tube Boiler*, air umpa boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam *drum*. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk uap dalam *drum*. Boiler jenis ini dipilih jika kebutuhan uap dan tekanan uap sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga (UNEP, 2008).



Gambar 2.4 *Water Tube Boiler*
Sumber : UNEP, 2008

3. Boiler Paket

Disebut dengan boiler paket sebab sudah tersedia sebagai paket yang lengkap. Pada saat dikirim ke pabrik hanya memerlukan pipa *steam*, pipa air, suplai bahan bakar dan sambungan listrik untuk dapat beroperasi. Paket boiler biasanya merupakan tipe *shell and tube* dengan rancangan *fire tube* dengan transfer panas baik radiasi maupun konveksi yang tinggi.



4. Boiler Pembakaran dengan *Fluidized Bed* (FBC)

Pembakaran dengan *Fluidized Bed* muncul sebagai alternatif yang memungkinkan dan memiliki kelebihan yang cukup berarti dibanding sistem pembakaran yang konvensional dan memberikan banyak keuntungan, misalnya rancangan boiler yang kompak, fleksibel terhadap bahan bakar, efisiensi pembakaran yang tinggi dan berkurangnya emisi polutan yang merugikan seperti SO_x dan NO_x .

5. *Atmospheric Fluidized Bed Combustion (AFBC)*

Boiler jenis ini berupa *shell boiler* konvensional biasa yang ditambah dengan sebuah *Fluidized Bed Combustor*. Sistem seperti ini telah digabungkan dengan *water tube boiler*/boiler pipa air konvensional.

6. *Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)*

Boiler jenis ini memakai sebuah kompresor untuk memasok udara *Force Draft (FD)* dan pembakarannya merupakan tangki bertekanan. Laju panas yang dilepas dalam *bed* sebanding dengan tekanan *bed* sehingga *bed* yang digunakan untuk mengestraksi sejumlah besar panas. Hal ini akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan penyerapan sulfur dioksida dalam *bed*.

7. *Stoker Fired Boiler*

Stoker diklasifikasikan menurut metode pengumpanan bahan bakar ke tungku dan oleh jenis *grate*-nya. Klasifikasi umumnya adalah *spreader stoker* dan *chain grate* atau *traveling grate stoker*. *Spreader stoker* memanfaatkan kombinasi pembakaran suspensi dan pembakaran *grate*. Batubara diumpankan secara kontinyu ke tungku diatas *bed* pembakaran batubara. Batubara yang halus dibakar dalam suspensi, partikel yang lebih besar akan jatuh ke *grate*, dimana batubara ini akan dibakar dalam *bed* batubara yang tipis dan pembakaran cepat. Metode pembakaran ini memberikan fleksibilitas yang baik terhadap fluktuasi beban, dikarenakan penyalaan hampir terjadi secara cepat bila laju pembakaran meningkat. Karena hal ini, *spreader stoker* lebih disukai

dibanding jenis *stoker* lainnya dalam berbagai penerapan di industri. Jenis lainnya adalah *chain-grate* atau *travelling-gate stoker*. Pada boiler jenis ini batubara diumpankan ke ujung *grate* baja yang bergerak. Ketika *grate* bergerak sepanjang tungku, batubara terbakar sebelum jatuh pada ujung sebagai abu. Diperlukan tingkat keterampilan tertentu, terutama bila menyetel *grate*, *dampers* udara dan *baffles* untuk menjamin pembakaran yang bersih serta menghasilkan seminimal mungkin jumlah karbon yang tidak terbakar dalam abu.

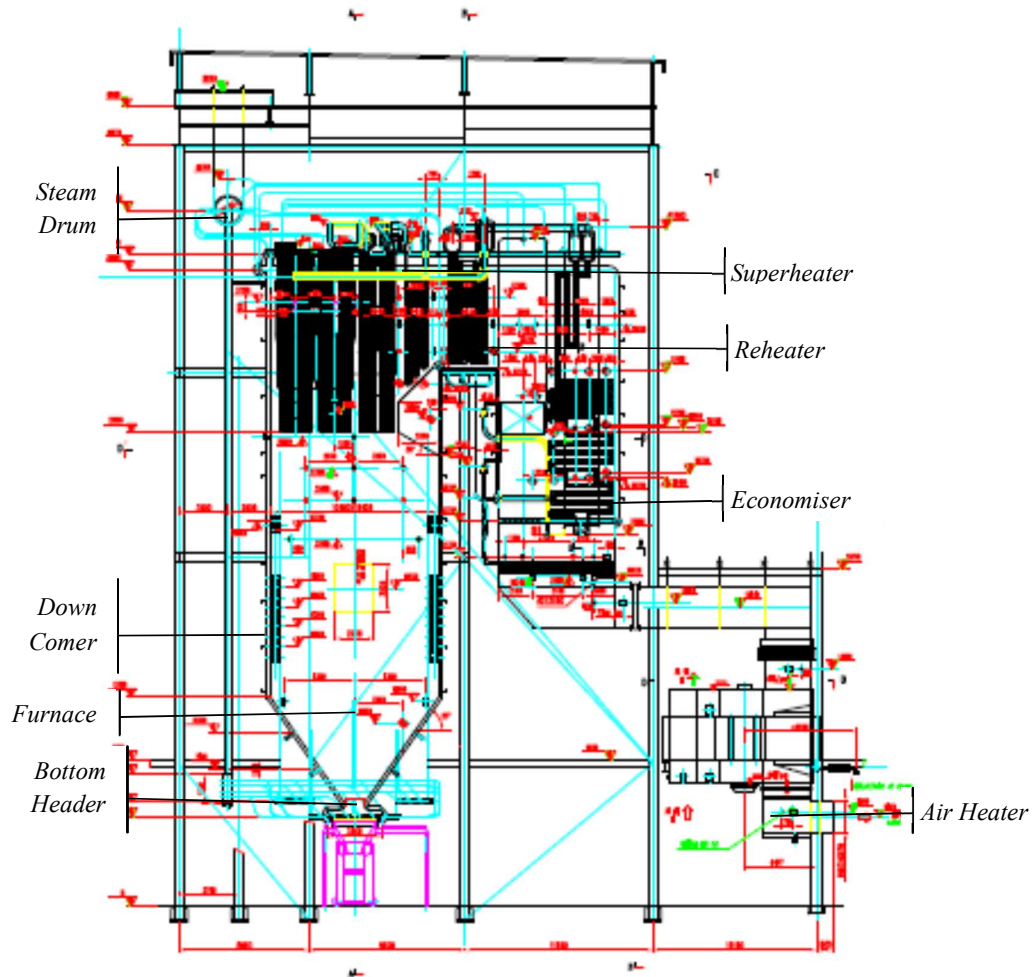
8. Boiler *Pulverized*

Kebanyakan boiler stasiun pembangkit tenaga yang berbahan bakar batubara menggunakan batubara halus, dan banyak boiler pipa air di industri yang lebih besar juga menggunakan batubara yang halus. Teknologi ini berkembang dengan baik dan diseluruh dunia terdapat ribuan unit dan lebih dari 90 persen kapasitas pembakaran batubara merupakan jenis ini (UNEP, 2008).

2.1.6 Boiler *Pulverized*

Jenis boiler ini yang paling banyak digunakan pada saat ini, menggunakan *mill* untuk menggiling batu bara menjadi serbuk sebelum diumpankan ke ruang bakar. Batu bara dihaluskan menjadi bubuk halus, dimana kurang dari 2% yaitu +300 mikro meter (μm) dan 70-75% dibawah 75 mikron untuk batu bara bituminous. Pembakaran berlangsung pada suhu 1300-1700°C tergantung *grade* batu bara. Boiler *Pulverized* memiliki banyak keunggulan seperti kemampuan menggunakan berbagai kualitas batubara, respon cepat terhadap perubahan beban,

menggunakan udara *pre-heat* bertemperatur tinggi dan lain-lain (Lakshmi dan P.S.Kishore, 2015).



Gambar 2.6 *Pulverized Coal Fire Boiler*
Sumber: *manual book PLTU Unit 1 Jeneponto*

2.1.7 Perpindahan Panas pada Boiler

Perpindahan panas yang terjadi pada boiler yaitu perpindahan panas secara pancaran (*radiation*), perpindahan panas secara aliran (*convection*) dan perpindahan panas secara rambatan (*conduction*) (Djokosetyoarjo, 1999).

1. Perpindahan Panas Secara Pancaran (*Radiation*)

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas antara suatu benda ke benda yang lain dengan jalan melalui gelombang-gelombang elektromagnetik tanpa tergantung kepada ada atau tidak adanya media diantara benda yang menerima pancaran panas tersebut.

Molekul-molekul api yang merupakan hasil pembakaran bahan bakar dan udara akan menyebabkan terjadinya gangguan keseimbangan elektromagnetis terhadap media yang disebut aether (materi bayangan tanpa bobot yang mengisi ruangan). Sebagaimana panas yang timbul dari hasil pembakaran tersebut diteruskan ke aether yang kemudian diteruskan kepada bidang yang akan dipanasi yaitu dinding atau pipa ketel.

2. Perpindahan Panas Secara Aliran (*Convection*)

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cair maupun gas). Molekul-molekul fluida tersebut dalam gerakannya melayang kesana kemari membawa sejumlah panas masing-masing Q Joule. Saat molekul fluida tersebut menyentuh dinding atau pipa ketel maka panasnya dibagikan sebagian kepada dinding atau pipa ketel, sedangkan sebagian lagi dibawa oleh molekul.

Gerakan-gerakan molekul yang melayang-layang tersebut disebabkan karena perbedaan temperatur didalam fluida itu sendiri. Gerakannya tersebut, molekul-molekul api tidak perlu melalui lintasan yang lurus untuk mencapai dinding bidang yang dipanasi.

3. Perpindahan Panas Secara Rambatan (*Conduction*)

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dari suatu bagian benda padat ke bagian lain dari benda padat yang sama atau dari benda padat yang satu ke benda padat yang lain karena terjadinya persinggungan fisik (kontak fisik atau menempel) tanpa terjadinya perpindahan panas molekul-molekul dari benda padat itu sendiri.

Panas akan dirambatkan oleh molekul-molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan api, menuju ke molekul-molekul dinding ketel sebelah luar yang berbatasan dengan air. Perambatan tersebut menempuh jarak terpendek (Arham dan Yusuf, 2015).

2.1.8 Batu bara

Batu bara merupakan salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat dibakar, terbentuk dari endapan organik, terutama sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pembatubaraan. Batu bara terdiri atas berbagai campuran karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan beberapa unsur lain. Sebagian karbon itu tetap padat ketika dipanaskan dan sebagian lagi akan berubah menjadi gas dan keluar bersama-sama unsur gas lainnya.

Terdapat banyak jenis batubara, berdasarkan *American Society for Testing and Materials* (ASTM), yang mengklasifikasikan batubara berdasarkan tingkat atau peringkat derajat metamorfisme (perubahan bentuk dan struktur dibawah pengaruh panas, tekanan dan air) mulai dari yang terendah yaitu lignit sampai

yang tertinggi yakni antrasit (ASTM D 388). Dibawah ini merupakan klasifikasi batu-bara:

a. Antrasit

Antrasit adalah tingkat tertinggi batubara, mengandung *fixed carbon* dengan nilai 86 sampai 98 persen massanya dalam keadaan kering, bebas kandungan mineral dan nilai kandungan materi yang mudah menguap rendah, dibawah 12-14 persen massanya. Antrasit memiliki nilai kalori diatas 7.777 kkal/kg.

b. Bituminus

Batubara Bituminus mengandung nilai *fixed carbon* 46-86 persen massanya dan mengandung 20-40 persen *volatile matter*, lebih tinggi dari pada jenis antrasit. Batubara Bituminus memiliki nilai kalor antara 6100-7800 kkal/kg

c. Sub-bituminus

Batubara jenis Subbituminus memiliki nilai kalor lebih rendah dibanding bituminus, nilai kalornya antara 4.600-6.400 kkal/kg. batubara jenis ini mengandung nilai *moisture* yang relatif tinggi, nilainya antara 15-30 persen, tapi rendah pada kandungan nilai sulfurnya.

d. Lignit

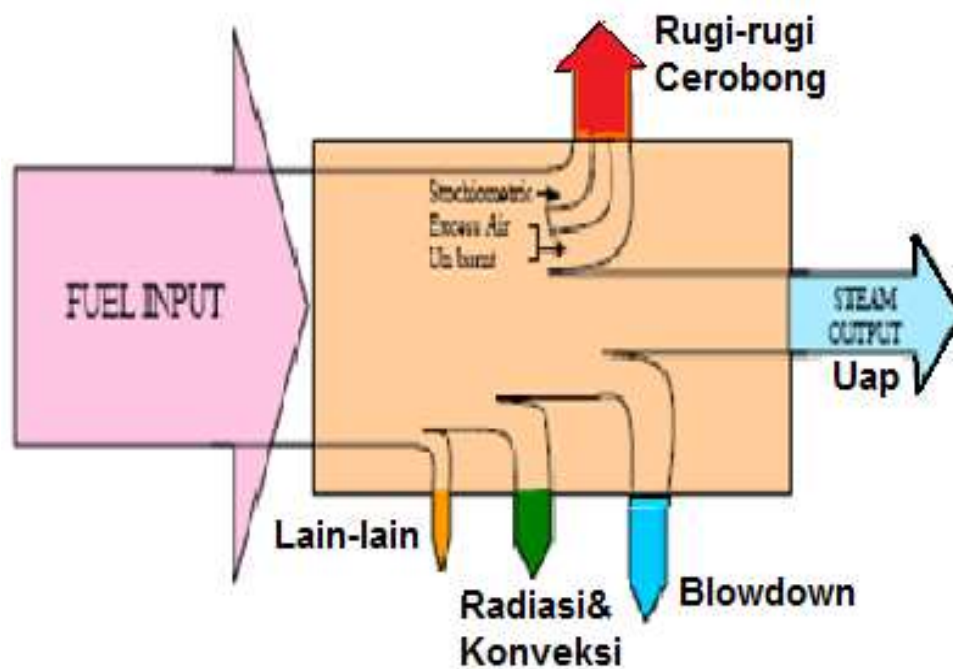
Batubara jenis lignit merupakan batubara kelas terendah, batubara jenis ini mengandung nilai *moisture* lebih dari 30 persen dan *volatile matter*. Nilai kalornya antara lebih rendah dari 3.500 kkal/kg sampai 4.600 kkal/kg. karena tingginya nilai *moisture* dan nilai kalornya rendah, lignit tidak ekonomis (EL-Wakil, 1992).

2.2 Evaluasi Kinerja Boiler

Parameter kinerja boiler, seperti efisiensi dan rasio penguapan berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Bahkan untuk boiler baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mengakibatkan buruknya kinerja boiler. Neraca panas dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Uji efisiensi boiler dapat membantu dalam menemukan penyimpangan efisiensi boiler dari efisiensi terbaik dan target area permasalahan untuk tindakan perbaikan (UNEP, 2008).

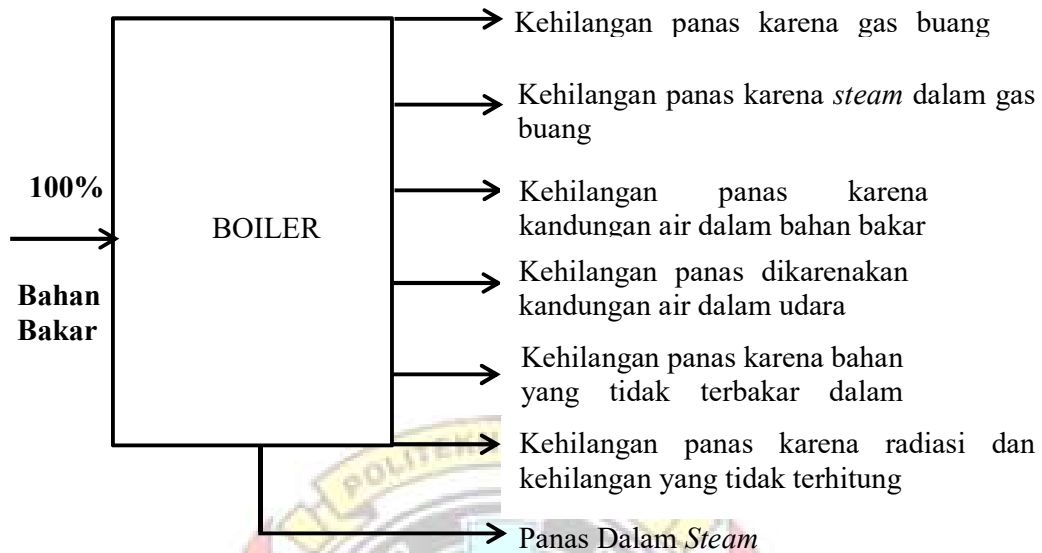
2.2.1 Neraca Kalor

Efisiensi dan rasio penguapan merupakan parameter kinerja boiler, seperti berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi. Neraca Kalor berfungsi membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Diagram alir energi dapat menggambarkan proses pembakaran didalam boiler. Diagram ini menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi. Jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing ditunjukkan dengan panah tebal (UNEP, 2008).



Gambar 2.7 Diagram Neraca Energi Boiler
 Sumber: UNEP, 2008

Keseimbangan energi total yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan boiler dalam bentuk yang berbeda disebut neraca panas. Kehilangan panas yang terjadi ditunjukkan dalam gambar berikut ini (UNEP, 2008).



Gambar 2.8 Kehilangan panas pada boiler
Sumber: UNEP, 2008

Kehilangan energi dapat dibagi kedalam kehilangan yang tidak atau dapat dihindarkan. Tujuan dari produksi bersih dan/atau pengkajian energi harus mengurangi kehilangan, yang dapat dihindari dengan meningkatkan efisiensi energi. Kehilangan berikut dapat dihindari atau dikurangi:

- a. Kehilangan panas pada gas cerobong
 - Udara berlebih (diturunkan hingga ke nilai minimum yang tergantung dari teknologi *burner*, operasi (kontrol), dan pemeliharaan)
 - Suhu gas cerobong (diturunkan dengan mengoptimalkan perawatan (pembersihan), *burner* yang lebih baik dan teknologi boiler).
- b. Kehilangan panas karena bahan bakar yang tidak terbakar dalam cerobong dan abu (mengoptimalkan operasi dan pemeliharaan; teknologi *burner* yang lebih baik).

- c. Kehilangan panas dari *blowdown* (pengolahan air umpan, daur ulang kondensat)
- d. Kehilangan panas karena konveksi dan radiasi (dikurangi dengan isolasi boiler yang lebih baik).

2.2.2 Efisiensi Boiler

Efisiensi adalah unjuk kerja suatu kemampuan alat utilitas. Disamping itu, definisi efisiensi boiler adalah tingkat kemampuan kerja boiler atau ketel uap yang didapat melalui perbandingan antara energi yang berpindah tempat atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Tingkat efisiensi pada boiler atau ketel uap tingkat efisiensinya berkisar antara 70% hingga 90% (Asmudi, 2010).

Terdapat dua metode pengkajian efisiensi boiler :

1. Metode Langsung

Dikenal juga sebagai “metode *input-output*” karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/*output* dan panas masuk/*input* (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi. Efisiensi ini dapat dievaluasi dengan menggunakan rumus:

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{\text{panas Keluar}}{\text{Panas Masuk}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Efisiensi Boiler} = \frac{\dot{m}_s \times (h_2 - h_1) + \dot{m}_r \times (h_4 - h_3)}{\dot{m}_f \times GCV} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Parameter yang dipantau untuk perhitungan efisiensi boiler adalah :

- Laju aliran uap *superheated* (\dot{m}_s) (kg/jam)

- Laju aliran uap *reheated* (\dot{m}_r) (kg/jam)
- Laju aliran bahan bakar (\dot{m}_f) (kg/jam)
- Tekanan uap *outlet superheater* (P_s) (kg/cm²) dan suhu uap *outlet superheater* (T_s) (°C)
- Tekanan uap *inlet/outlet reheater* (P_r) (kg/cm²) dan suhu *inlet/outlet reheater* (T_r) (°C)
- *Feed water temperature* (°C)
- Nilai panas kotor bahan bakar (GCV) (kkal/kg bb)

Dimana :

- h_1 = Entalpi spesifik uap jenuh *outlet superheater* dalam kkal/kg uap
- h_2 = Entalpi spesifik air umpan dalam kkal/kg air
- h_3 = Entalpi spesifik uap inlet *reheater* dalam kkal/kg uap
- h_4 = Entalpi spesifik uap outlet *reheater* dalam kkal/kg uap

Kelebihan metode langsung

- Pekerja dapat dengan cepat mengevaluasi efisiensi boiler
- Memerlukan sedikit parameter untuk perhitungan
- Memerlukan sedikit instrument untuk pemantauan
- Mudah membandingkan rasio penguapan dengan dua *benchmark*

Kekurangan metode langsung

- Tidak memberikan petunjuk kepada operator tentang penyebab dari efisiensi sistem yang lebih rendah
- Tidak menghitung berbagai kehilangan yang berpengaruh pada berbagai tingkat efisiensi (UNEP, 2008)

2. Metode Tidak Langsung

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 Tes Code Steam Generating Units* (UNEP, 2008).

Metode tidak langsung juga dikenal dengan metode kehilangan panas.

Efisiensi boiler (η) = $100 - (i + ii + iii + iv + v + vi + vii) \%$

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
- vi. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu bawah
- vii. Radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung

Kehilangan yang diakibatkan oleh kadar air dalam bahan bakar dan disebabkan oleh pembakaran hidrogen tergantung pada bahan bakar, dan tidak dapat dikendalikan oleh perancangan.

Data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi boiler adalah:

- Analisis *ultimate* bahan bakar (H₂, O₂, S, C, kadar air, kadar abu).
- Persentase oksigen atau CO₂ dalam gas buang.
- Temperatur gas buang (°C)

- Temperatur udara sekitar (°C) dan kelembaban udara (kg/kg) udara kering
- GCV bahan bakar (kkal/kg)
- Persentase bahan yang dapat terbakar dalam abu (untuk bahan bakar padat)
- GCV abu dalam kkal/kg (untuk bahan bakar padat)

Prosedur rinci untuk perhitungan efisiensi boiler adalah sebagai berikut:

Tahap 1: Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud\ teoritis}$)

$$W_{ud\ teoritis} = [(11,43 \times C) + \{34,5 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4,32 \times S)]/100$$

kg/kg bb (2.3)

Tahap 2: Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{persentase } O_2}{21 - \text{persentase } O_2} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Tahap 3: Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar (AAS)

$$AAS = \{1 + EA/100\} \times \text{udara teoritis}$$

Tahap 4 : Memperkirakan seluruh kehilangan panas

a. Persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering

(L_{dg})

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg}(T_g - T_a)}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

m = Massa gas buang kering (kg/kg bb)

$m = (\text{massa hasil pembakaran kering kg/kg bahan bakar}) + (\text{massa N}_2 \text{ dalam bahan bakar pada basis 1 kg}) + (\text{massa N}_2 \text{ dalam massa udara pasokan yang sebenarnya})$

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

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

$C_{pg} = \text{Panas jenis gas buang } (0,23 \text{ kkal/kg}) \text{ (UNEP, 2008)}$

b. Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena adanya H₂ dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

$H = \text{Unsur hidrogen dalam bahan bakar}$

$C_{ps} = \text{Panas jenis uap lewat jenuh/superheated steam } (0,45 \text{ kkal/kg}) \text{ (UNEP, 2008).}$

c. Persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{\text{MF} \{584 + C_{ps}(T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

$\text{MF} = \text{persentase kadar air dalam 1 kg bahan bakar}$

$C_{ps} = \text{Panas jenis uap lewat jenuh/superheated steam } (0,45 \text{ kkal/kg}) \text{ (UNEP, 2008).}$

d. Persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{\text{AAS} \times \text{faktor kelembaban} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

C_{ps} = Panas jenis uap lewat jenuh/*superheated steam* (0,45 kkal/kg)

(UNEP, 2008).

e. Persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan radiasi dan konveksi aktual sulit dikaji sebab daya emisifitas permukaan yang beraneka ragam, kemiringan, pola aliran udara dan lain-lain. Boiler yang berkapasitas relatif kecil, dengan kapasitas 10 MW kehilangan radiasi dan yang tidak terhitung dapat mencapai 1 hingga 2 persen nilai kalor kotor bahan bakar, sementara pada boiler 500 MW nilainya 0,2 hingga 1,5 persen. Kehilangan dapat diasumsikan secara tepat tergantung pada kondisi permukaan.

f. Persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida kerja (L_{tot})

$$L_{tot} = L_{dg} + L_H + L_{mf} + L_{ma} + L_{uc} \dots\dots\dots (2.8)$$

Tahap 5 : Menghitung efisiensi boiler

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100 - L_{tot} \dots\dots\dots (2.9)$$

Kelebihan 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

Kekurangan metode tidak langsung

- Perlu waktu lama
- Memerlukan fasilitas laboratorium untuk analisis

2.3 Analisa Gas Asap

Pembakaran sempurna akan membentuk gas karbon dioksida, sulfur dioksida dan uap air dalam gas asap yang dihasilkan. Karena tidak mencapai pembakaran sempurna, maka gas asap juga mengandung karbon monoksida, sisa oksigen dan nitrogen. Kondisi pembakaran secara nyata juga memberikan kemungkinan nitrogen untuk bereaksi dengan oksigen membentuk oksigen nitrogen (Karaeng dan Iswandi, 2012).

Bila data karakteristik bahan bakar udara lebih akan dibutuhkan dan kesempurnaan pembakaran dapat diperkirakan, maka komposisi gas asap dapat diperkirakan sebagai berikut: (Arham dan Muh. Yusuf Septiawan, 2015)

$$\text{CO}_2 = (44/12) C \text{ (kg/kg bb)} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\text{SO}_2 = (64/32) S = 2 S \text{ (kg/kg bb)} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{N}_2 = N + (0,768 \times W_{\text{ud actual}}) \text{ (kg/kg bb)} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\text{O}_2 = (W_{\text{ud actual}} - W_{\text{ud teoritis}}) 0,232 \text{ (kg/kg bb)} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{MF} + (9\text{H}_2) + (0,013 W_{\text{ud teoritis}}) \text{ (kg/kg bb)} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

C,H,S,N = Elemen-elemen bahan bakar (kg/kg bb)

MF = Kandungan uap basah (kg/kg bb)

2.4 Boiler *Pulverized* PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1

Boiler adalah salah satu peralatan utama PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap dengan memanfaatkan energi panas yang diperoleh dari hasil pembakaran bahan bakar. Boiler di PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1 adalah jenis *Pulverized* dimana menggunakan *mill* untuk menggiling batu bara menjadi serbuk sebelum diumpankan ke ruang bakar. Terdapat 4 set *mill* pada unit 1 PLTU Jeneponto. Batu bara yang digunakan yaitu batu bara dengan GCV antara 4.300-6.800 kkal/kg.

Boiler di PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1 adalah boiler *super-pressure natural circulation drum* dengan karakteristik *once reheating, single furnace, four-corner burner, tangential combustion, balanced draft, dry bottom, rotary air preheater* dan *full steel structure*.

Sistem sirkulasi air dari boiler yang digunakan terdiri dari *drum, central downcomers, connection pipes, water wall riser* dan *steam/water outlet pipes*. Adapun sistem *superheater* adalah tipe *radiation-convection* dan temperatur uap stabil/fluktuasi beban. Sistem *Reheater* adalah tipe konveksi yang terdiri dari *cool section RH* dan *hot section RH*. Sistem *Economizer* terdiri dari *lower stage economizer, upper stage economizer* dan *hanging tubes*.

Berikut merupakan spesifikasi Boiler *Pulverized* PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1:

<i>Boiler rated evaporating capacity (BMCR)</i>	410 t/h
<i>Superheated steam pressure (BMCR)</i>	13.8 MPa (<i>gauge pressure</i>)
<i>Superheated steam temperature (BMCR)</i>	540 °C

<i>Reheat steam flow (BMCR)</i>	334.6 t/h
<i>Reheat steam temperature (inlet/outlet) (BMCR)</i>	2.44/2.26 MPa (<i>gauge pressure</i>)
<i>Feed water temperature (inlet/outlet) (BMCR)</i>	316.8/540 °C
<i>Air preheater inlet cool air temperature (primary air/secondary wind) (BMCR)</i>	27/27 °C
<i>Air preheater outlet hot air temperature (primary air/secondary wind) (BMCR)</i>	346/353 °C
<i>Boiler exhaust gas temperature (before correction/after correction) (BMCR)</i>	141/133 °C
<i>Feedwater temperature</i>	243.2 °C

2.5 Penelitian yang Relevan

Penelitian yang dilakukan oleh Arham dan Septiawan (2015) yang meneliti tentang Evaluasi Kinerja Boiler *Combustion Fluidized Bed* (CFB) di PT. PLN (Persero) Unit PLTU Barru menyimpulkan bahwa berdasarkan data dan analisa maka diketahui efisiensi PLTU Barru unit 1 mengalami penurunan secara signifikan dengan menggunakan metode langsung sebesar 18.75%. Efisiensi PLTU Barru unit 1 mengalami penurunan sebesar 3.84% dengan menggunakan metode tidak langsung (kehilangan panas).

Penelitian yang dilakukan oleh Asmudi, yang meneliti tentang Analisa Unjuk Kerja Boiler Terhadap Penurunan Daya Pada PLTU PT. Indonesia Power UBP Perak menyimpulkan bahwa berdasarkan data dan analisa maka diketahui penurunan unjuk kerja boiler sebesar 14,15%, dari 87,35% pada saat komisioning menjadi 73,20% pada kondisi sekarang. Tujuan menghasilkan daya listrik yang sama (37,25 MW), pada kondisi sekarang telah mengalami kenaikan: bahan bakar, udara pembakaran, dan air umpan, dengan masing-masing kenaikan sebesar

4,28%, 4,97%, dan 11,53%. Adanya pengaruh pengotoran baik yang timbul dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler, ini dapat dilihat dari indikator naiknya gas buang dari 11.25% menjadi 14.85%.

Penelitian yang dilakukan oleh Hendaryati (2012) yang meneliti tentang Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap di Pabrik Gula Kebonagung Malang menyimpulkan bahwa Kerugian-kerugian akibat panas yang hilang berpengaruh pada kinerja ketel uap, kerugian-kerugian ini berarti kehilangan energi yang terjadi pada ketel uap, kondisi ini dapat mengakibatkan efisiensi ketel menurun. Kerugian energi ini sebenarnya dapat dihindari dengan mengoptimalkan perawatan ketel uap. Efisiensi termal rata-rata dari ketel uap Yoshimine H-2700 adalah 74,8 % dan Ketel Uap Yoshimine H-3500 adalah 73,99 % dan berdasarkan Diagram Sankey jumlah panas yang masuk ketel uap untuk kedua ketel adalah 1713,194 kkal/kg bb. Panas yang hilang untuk Ketel Uap Yoshimine H-2700 adalah 425,915 kkal/kg bb, sehingga panas yang digunakan adalah 1287,279 kkal/kg bb. Sedangkan panas yang hilang untuk Ketel Uap Yoshimine H-3500 adalah 445,653 kkal/kg bb, sehingga panas yang digunakan adalah 1267,541 kkal/kg bb.

Penelitian yang dilakukan oleh Ginting et al (2014) yang meneliti tentang Analisa Efisiensi Exergi *Boiler* Di PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power Semarang-Jawa Tengah menyimpulkan bahwa Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi total dipengaruhi oleh laju aliran massa uap dan daya *output* generator. Kemudian nilai rata-rata efisiensi energi total lebih besar dibandingkan nilai rata-rata efisiensi exergi total dimana masing-

masing bernilai 72.40% dan 71.84%. Kemudian Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *heat exchanger* dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam*, temperatur *flue gas*, sistem insulasi, kebersihan *tubes* dan jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown*.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

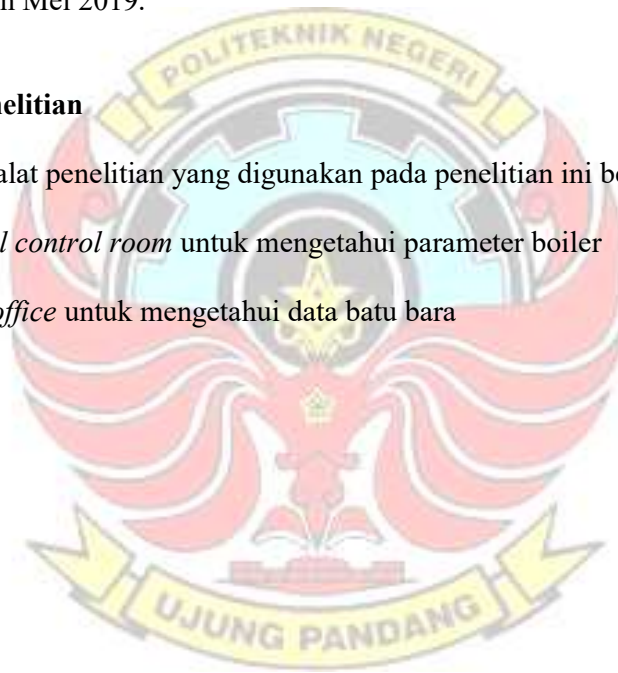
Penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Jeneponto Unit 1, Kab. Jeneponto, Prov. Sulawesi Selatan.

Peneliti melakukan pengamatan pada boiler PLTU Jeneponto 2x125 MW Unit 1. Adapun waktu pelaksanaan penelitian yaitu mulai bulan Maret 2019 sampai dengan Mei 2019.

3.2 Alat Penelitian

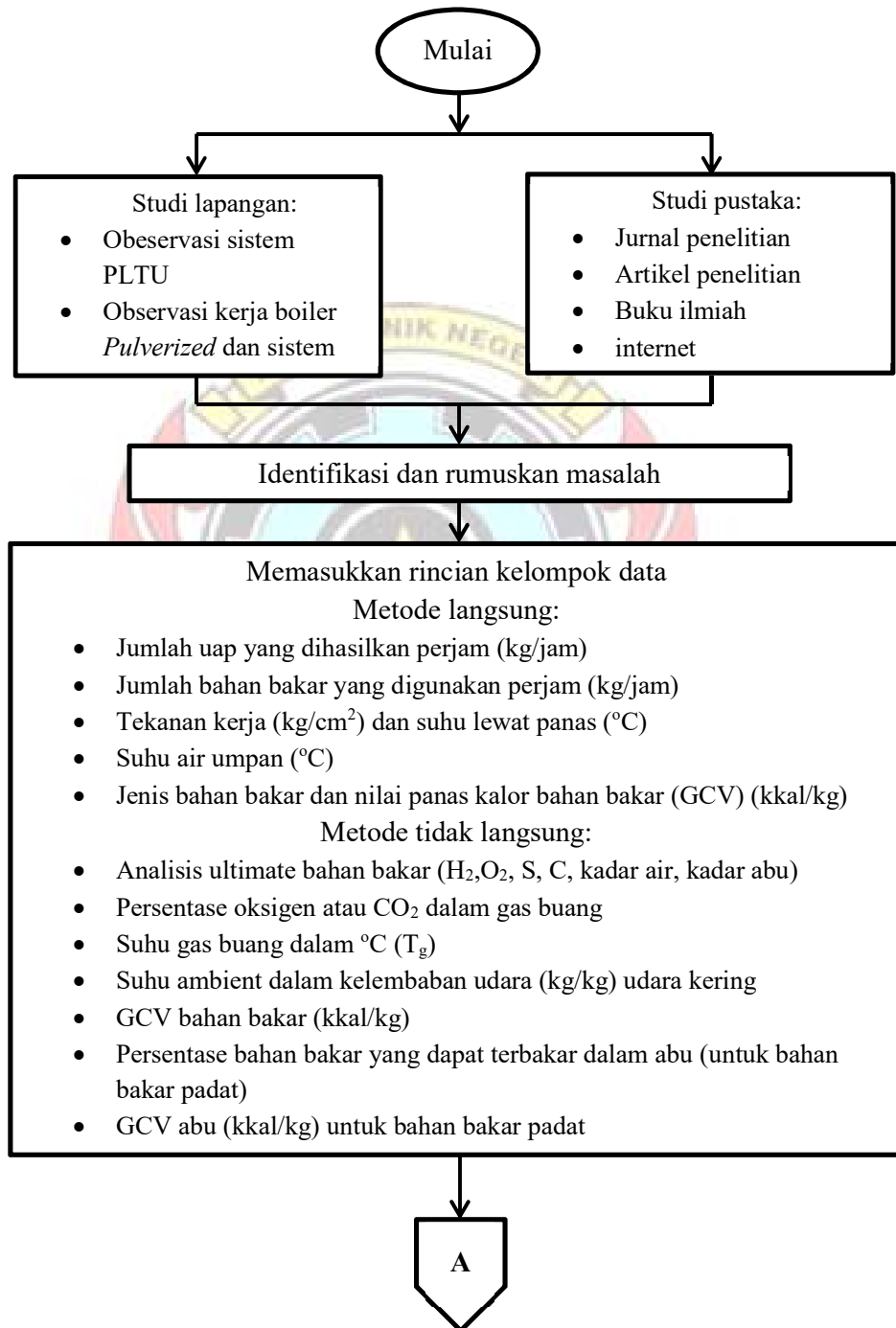
Adapun alat penelitian yang digunakan pada penelitian ini berupa:

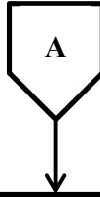
1. *central control room* untuk mengetahui parameter boiler
2. *main office* untuk mengetahui data batu bara



3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur pada penelitian ini adalah sebagai berikut:





Memasukkan persamaan untuk menghitung efisiensi boiler

Metode langsung :

$$\text{Efisiensi boiler} : \frac{\text{panas keluar}}{\text{panas masuk}} \times 100\%$$

Metode tidak langsung :

- Menghitung kebutuhan udara teoritis
- Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)
- Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok per kg bahan bakar ($W_{\text{udara actual}}$)

Memperkirakan seluruh kehilangan panas:

- Persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering
- Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena adanya H_2 dalam bahan bakar
- Persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar
- Persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara
- Persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida kerja (L_{tot})
- Menghitung efisiensi boiler dan rasio penguapan boiler

Hasil dan Pembahasan

Kesimpulan

Selesai

3.4 Teknik Pengumpulan Data

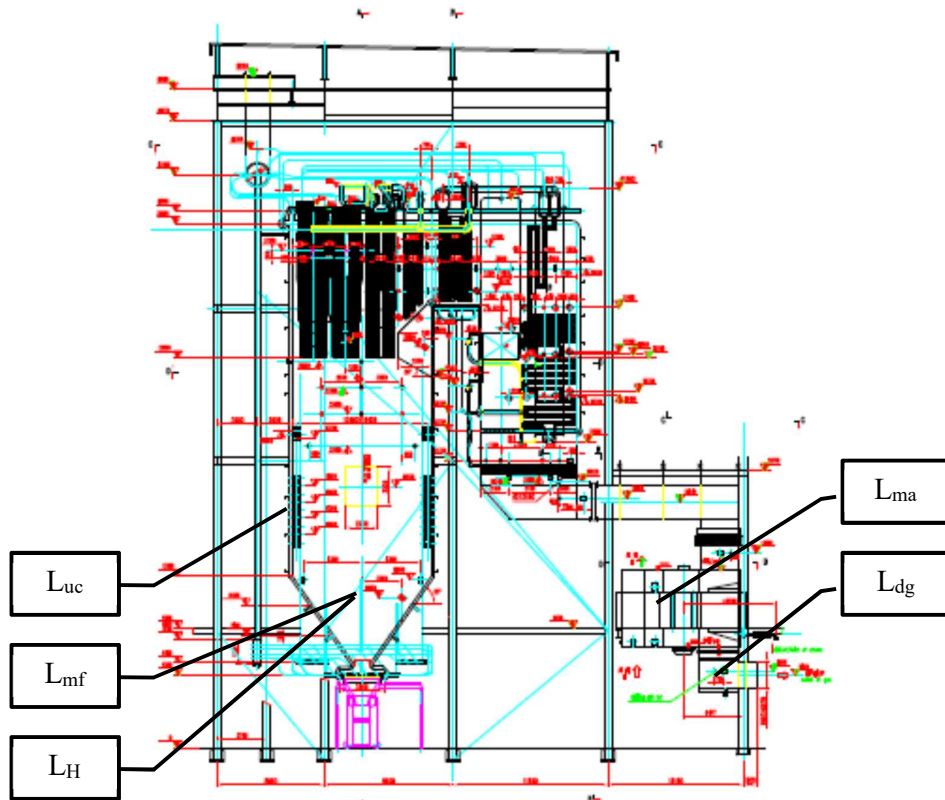
Pengumpulan data yang diperlukan dilakukan dengan cara sebagai berikut :

1. Teknik wawancara, yaitu melakukan wawancara dengan operator operasi PLTU Jeneponto 2x125 MW untuk mendapatkan informasi yang diperlukan
2. Mereview dokumen laporan operasi PLTU Jeneponto 2x125 MW yang berhubungan dengan data yang diperlukan kemudian mencatatnya
3. Melakukan pengamatan langsung di *central control room* kemudian mencatat data-data yang diperlukan.

3.5 Teknik Analisis Data

Data boiler yang diperoleh dari sistem PLTU Jeneponto 2x125 MW kemudian dimasukkan ke dalam persamaan yang menggunakan metode langsung dan tidak langsung untuk mengetahui efisiensi boiler:

1. Analisis dengan menggunakan metode langsung yaitu energi yang didapat dari fluida kerja (air dan *steam*) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar.
2. Analisis dengan menggunakan metode tidak langsung yaitu energi yang masuk pada boiler dikurangi dengan nilai kerugian panas yang terjadi pada boiler.



Gambar 3.1 Letak kehilangan panas pada boiler dengan metode tidak langsung
 Sumber: *manual book* PLTU Unit 1 Jeneponto



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Kondisi Operasi saat Komisioning Tahun 2012

Nilai dari efisiensi boiler diperoleh dari data *Report for Boiler Performance Test of Unit 1*. Pada waktu komisioning nilai efisiensi Boiler adalah sebagai berikut:

- Efisiensi Boiler pada operasi 100% (125 MW) : 92,78%
- Efisiensi Boiler pada operasi 80% (100 MW) : 92,27%
- Efisiensi Boiler pada operasi 75% (94 MW) : 93,37%
- Efisiensi Boiler pada operasi 50% (62,5 MW) : 93,24%

4.1.2 Kondisi Operasi Tanggal 5 Agustus 2018 pada Beban 100 MW

a. Menentukan Efisiensi Boiler dengan Metode Langsung

Berdasarkan tabel 4.1 pada lampiran 1 diperoleh data-data sebagai berikut:

- *Feed Water Temperature* (T_1) : 223,49 °C
- *Steam Flow* (\dot{m}_s) : 289,99 ton/jam
- *Superheater Outlet Steam Pressure* (P_2) : 8,11 MPa
- *Superheater Outlet Steam Temperature* (T_2) : 533,24 °C
- *Reheater Inlet Steam Pressure* (P_3) : 2 MPa
- *Reheater Inlet Steam Temperature* (T_3) : 395,6 °C
- *Reheater Outlet Steam Pressure* (P_4) : 2 MPa
- *Reheater Outlet Steam Temperature* (T_4) : 522,3 °C
- *Coal Flow* (\dot{m}_f) : 60,94 ton/jam

- GCV : 4.344 kkal/kg

Analisis dengan metode langsung maka data-data diatas dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi Boiler} &= \frac{\text{Panas Keluar}}{\text{Panas Masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{\dot{m}_s \times (h_2 - h_1) + \dot{m}_r \times (h_4 - h_3)}{\dot{m}_f \times \text{GCV}} \times 100\% \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 8,11 MPa dan suhu 533,24°C diperoleh :

$$\begin{aligned} h_2 &= 3479,6 \text{ kJ/kg} \\ &= 831,6 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Compressed liquid water* pada temperatur air umpan 223,49°C dan tekanan 8,11 MPa diperoleh :

$$\begin{aligned} h_1 &= 961,17 \text{ kJ/kg} \\ &= 229,72 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 2 MPa dan suhu 522,3°C diperoleh :

$$\begin{aligned} h_4 &= 3517,89 \text{ kJ/kg} \\ &= 837,25 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 2 MPa dan suhu 395,6°C diperoleh :

$$\begin{aligned} h_3 &= 3238,65 \text{ kJ/kg} \\ &= 770,79 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Efisiensi Boiler adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{289.990 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times (831,6 - 229,72) \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} + 289.990 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times (837,25 - 7,79) \frac{\text{kkal}}{\text{kg}}}{60.940 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 4.344 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$= 73,24\%$$

b. Menentukan Efisiensi Boiler dengan Metode Tidak Langsung

Berdasarkan metode *Heat Loss* (kehilangan panas) sesuai standar ASME PTC 4-1 dengan data analisa batubara, temperatur gas buang pada *air heater*, temperatur udara sekitar dan beberapa asumsi yang diperlukan maka efisiensi termal boiler dapat dihitung. Berdasarkan tabel 4.2 pada lampiran 1 dengan data sebagai berikut:

- Analisa Ultimate Batubara

C = 31,8%

H = 3,4%

N = 1,1%

S = 0,10%

O = 13%

ASH = 3,1 %

Moisture (MF) = 30,2%

GCV = 4.344 kkal/kg

- *Ambient Temperature* (T_a) = 33 °C

- Suhu Gas Buang (T_g) = 144,54 °C

- Persentase Oksigen = 2,53 %

- Kelembaban Udara = 0,02 kg/kg udara kering

Dengan metode tidak langsung maka data-data diatas dapat dianalisis sebagai berikut:

Tahap 1 : Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud\ teoritis}$)

$$W_{ud\ teoritis} = \left[\frac{(11,43 \times C) + \left\{ 34,5 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) \right\} + (4,32 \times S)}{100} \right]$$

$$W_{ud\ teoritis} = \left[\frac{(11,43 \times 31,8) + \left\{ 34,5 \times \left(3,4 - \frac{13}{8} \right) \right\} + (4,32 \times 0,10)}{100} \right]$$

$$W_{ud\ teoritis} = 4,25 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

Tahap 2 : Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{Persentase } O_2}{21 - \text{Persentase } O_2} \times 100\%$$

$$EA = \frac{2,53}{21 - 2,53} \times 100\%$$

$$= 13,70 \%$$

Tahap 3 : Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar

(AAS)

$$AAS = \left[1 + \frac{EA}{100} \right] \times W_{ud\ teoritis}$$

$$AAS = \left[1 + \frac{13,70}{100} \right] \times 4,25$$

$$AAS = 4,83 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

Tahap 4: Memperkirakan seluruh kehilangan panas

- i. Persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering (L_{dg})

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg}(T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

Dalam hal ini,

$m = \text{massa C} + \text{massa S} + \text{massa N} + \text{massa O}$

$$m = \frac{0,31 \times 44}{12} + \frac{0,0001 \times 64}{32} + 0,011 \frac{4,83 \times 77}{100} + \frac{(4,83 + 4,25) \times 23}{100}$$

$$= 4,98 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$L_{dg} = \frac{4,98 \times 0,23(144,54 - 33)}{4.344} \times 100\%$$

$$= 2,94\%$$

- ii. Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_H = \frac{9 \times 0,034 \{584 + 0,45 \times (144,54 - 33)\}}{4.344} \times 100\%$$

$$L_H = 4,47\%$$

- iii. Persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{MF \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{mf} = \frac{0,302 \{584 + 0,45(144,54 - 33)\}}{4.344} \times 100\%$$

$$L_{mf} = 4,41 \%$$

- iv. Persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{\text{AAS} \times \text{faktor kelembaban} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{ma} = \frac{4,83 \times 0,02 \times 0,45 (144,54 - 33)}{4.344} \times 100\%$$

$$L_{ma} = 0,11\%$$

- v. Persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan panas karena radiasi dan lainnya merupakan kehilangan panas akibat terpancarnya panas ke permukaan komponen boiler dan kehilangan panas yang tak terhitung lainnya. Kehilangan panas tersebut yang persentasenya rumit untuk dihitung secara pasti, maka dari itu diasumsikan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5 %.

- vi. Persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida kerja (L_{tot})

$$L_{tot} = L_{dg} + L_H + L_{mf} + L_{ma} + L_{uc}$$

$$L_{tot} = 2,94 + 4,47 + 4,41 + 0,11 + 1,5$$

$$L_{tot} = 13,43\%$$

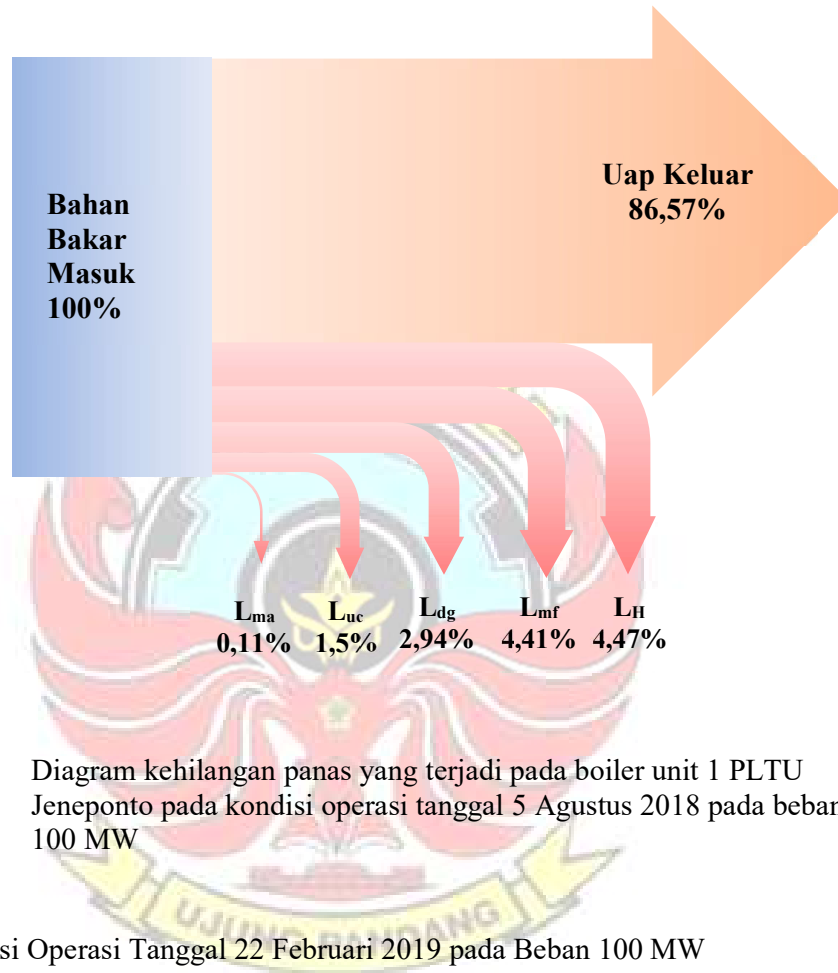
Tahap 5 : Menghitung efisiensi boiler

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100\% - L_{tot}$$

$$= 100\% - 13,43\%$$

$$= 86,57\%$$

Berikut merupakan persentase tiap-tiap kehilangan panas yang terjadi pada boiler:



Gambar 4.1 Diagram kehilangan panas yang terjadi pada boiler unit 1 PLTU Jenepono pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 pada beban 100 MW

4.1.3 Kondisi Operasi Tanggal 22 Februari 2019 pada Beban 100 MW

a. Menentukan Efisiensi Boiler dengan Metode Langsung

Berdasarkan tabel 4.3 pada lampiran 1 dengan data sebagai berikut:

- *Feed Water Temperature* (T_1) : 220,8°C
- *Steam Flow* (\dot{m}_s) : 289,35 ton/jam
- *Superheater Outlet Steam Pressure* (P_2) : 8,26 MPa
- *Superheater Outlet Steam Temperature* (T_2) : 532,65°C

- *Reheater Inlet Steam Pressure* (P_3) : 2 MPa
- *Reheater Inlet Steam Temperature* (T_3) : 401,7°C
- *Reheater Outlet Steam Pressure* (P_4) : 2 MPa
- *Reheater Outlet Steam Temperature* (T_4) : 518,2°C
- *Coal Flow* (\dot{m}_f) : 61,98 ton/jam
- *GCV* : 4.486 kkal/kg

Analisis dengan metode langsung maka data-data diatas dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi Boiler} &= \frac{\text{Panas Keluar}}{\text{Panas Masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{\dot{m}_s \times (h_2 - h_1) + \dot{m}_r \times (h_4 - h_3)}{\dot{m}_f \times \text{GCV}} \times 100\% \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 8,26 MPa dan suhu 532,65°C diperoleh :

$$\begin{aligned} h_2 &= 3476,6 \text{ kJ/kg} \\ &= 830,9 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Compressed liquid water* pada temperatur air umpan 230,8°C dan tekanan 8,26 MPa diperoleh:

$$\begin{aligned} h_1 &= 949,01 \text{ kJ/kg} \\ &= 226,81 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 2 MPa dan suhu 518,2°C diperoleh :

$$\begin{aligned} h_4 &= 3508,78 \text{ kJ/kg} \\ &= 835 \text{ kkal/kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel uap *Superheated* pada tekanan Boiler 2 MPa dan suhu 401,7°C diperoleh :

$$h_3 = 3252,14 \text{ kJ/kg}$$

$$= 774 \text{ kkal/kg}$$

Efisiensi Boiler adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{289.350 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times (830,9 - 226,81) \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} + 289.350 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times (835 - 7) \frac{\text{kkal}}{\text{kg}}}{61.980 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 4.486 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}}} \times 100\%$$

$$= 70,40\%$$

b. Menentukan Efisiensi Boiler dengan Metode Tidak Langsung

Berdasarkan metode *Heat Loss* (kehilangan panas) sesuai standar ASME PTC 4-1 dengan data analisa batubara, temperatur gas buang pada *air heater*, temperatur udara sekitar dan beberapa asumsi yang diperlukan maka efisiensi termal boiler dapat dihitung. Berdasarkan tabel 4.4 pada lampiran 1 dengan data sebagai berikut:

- Analisa Ultimate Batubara

C = 31,3%

H = 3,8%

N = 1,1%

S = 0,10%

O = 13%

ASH = 2,9%

Moisture (MF) = 33,7%

GCV = 4.486 kkal/kg

- *Ambient Temperature* (T_a) = 33°C
- Suhu Gas Buang (T_g) = 147,4°C
- Persentase Oksigen = 4,3%
- Kelembaban Udara = 0,02 kg/kg udara kering

Dengan metode tidak langsung maka data-data diatas dapat dianalisis sebagai berikut:

Tahap 1 : Menghitung kebutuhan udara teoritis ($W_{ud\ teoritis}$)

$$W_{ud\ teoritis} = \left[\frac{(11,43 \times C) + \left\{ 34,5 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) \right\} + (4,32 \times S)}{100} \right]$$

$$W_{ud\ teoritis} = \left[\frac{(11,43 \times 31,3) + \left\{ 34,5 \times \left(3,8 - \frac{13}{8} \right) \right\} + (4,32 \times 0,1)}{100} \right]$$

$$W_{ud\ teoritis} = 4,33 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

Tahap 2 : Menghitung persentase kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$EA = \frac{\text{Persentase } O_2}{21 - \text{Persentas } O_2} \times 100\%$$

$$EA = \frac{4,3}{21 - 4,3} \times 100\%$$

$$= 25,75\%$$

Tahap 3 : Menghitung massa udara sebenarnya yang dipasok kg/kg bahan bakar

(AAS)

$$AAS = \left[1 + \frac{EA}{100} \right] \times W_{ud\ teoritis}$$

$$AAS = \left[1 + \frac{25,75}{100} \right] \times 4,33$$

$$AAS = 5,45 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

Tahap 4: Memperkirakan seluruh kehilangan panas

- i. Persentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering (L_{dg})

$$L_{dg} = \frac{m \times C_{pg}(T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

Dalam hal ini,

m = massa C + massa S + massa N + massa O

$$m = \frac{0,31 \times 44}{12} + \frac{0,001 \times 64}{32} + 0,011 \frac{5,45 \times 77}{100} + \frac{(5,45 - 4,33) \times 23}{100}$$
$$= 5,58 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

$$L_{dg} = \frac{5,58 \times 0,23 (147,4 - 33)}{4.486} \times 100\%$$
$$= 3,27\%$$

- ii. Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H)

$$L_H = \frac{9 \times H \{584 + C_{ps} \times (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_H = \frac{9 \times 0,038 \{584 + 0,45 \times (147,4 - 33)\}}{4.486} \times 100\%$$

$$L_H = 4,84\%$$

- iii. Persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (L_{mf})

$$L_{mf} = \frac{MF \{584 + C (T_g - T_a)\}}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{mf} = \frac{0,337 \{584 + 0,45(147,4 - 33)\}}{4.486} \times 100\%$$

$$L_{mf} = 4,77\%$$

- iv. Persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma})

$$L_{ma} = \frac{\text{AAS} \times \text{faktor kelembaban} \times C_{ps} (T_g - T_a)}{\text{GCV bahan bakar}} \times 100\%$$

$$L_{ma} = \frac{5,45 \times 0,02 \times 0,45 (147,4 - 33)}{4.486} \times 100\%$$

$$L_{ma} = 0,13\%$$

- v. Persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc})

Kehilangan panas karena radiasi dan lainnya merupakan kehilangan panas akibat terpancarnya panas ke permukaan komponen boiler dan kehilangan panas yang tak terhitung lainnya. Kehilangan panas tersebut yang persentasenya rumit untuk dihitung secara pasti, maka dari itu diasumsikan persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan yang tak terhitung (L_{uc}) sebesar 1,5 %.

- vi. Persentase kehilangan panas total pada boiler bila panas hanya digunakan untuk pemanasan fluida kerja (L_{tot})

$$L_{tot} = L_{dg} + L_H + L_{mf} + L_{ma} + L_{uc}$$

$$L_{tot} = 3,27 + 4,84 + 4,77 + 0,13 + 1,5$$

$$L_{tot} = 14,52\%$$

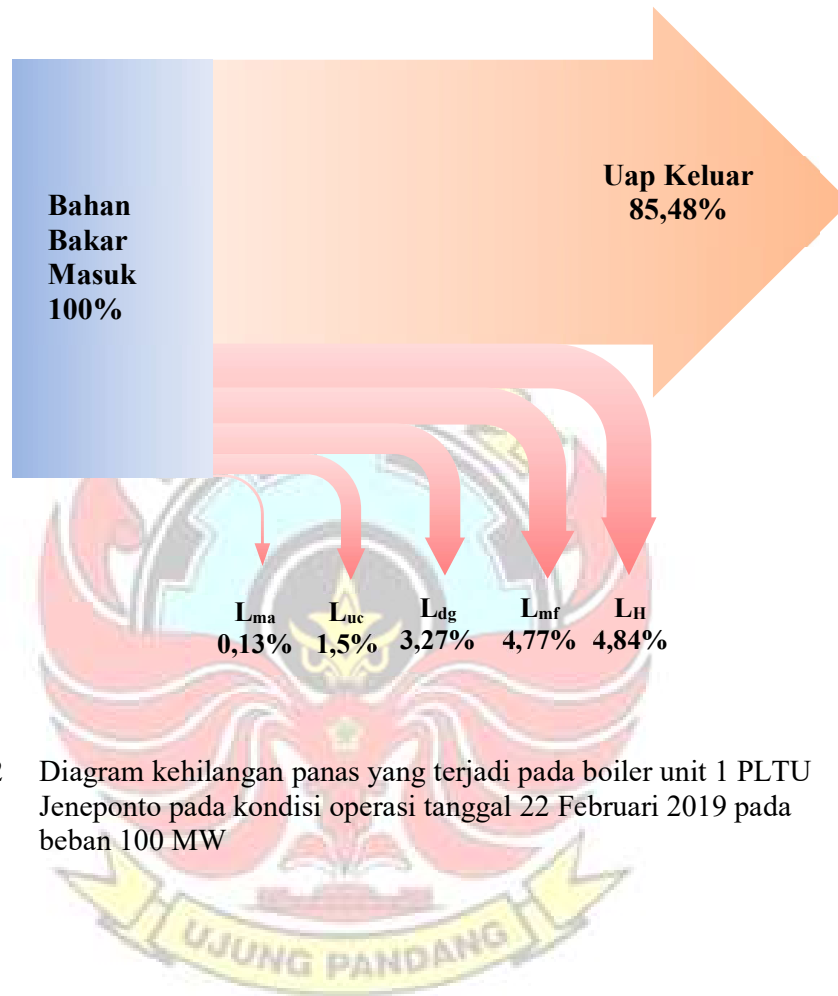
Tahap 5 : Menghitung efisiensi boiler

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100\% - L_{tot}$$

$$\text{Efisiensi Boiler} = 100\% - 14,52\%$$

$$= 85,48\%$$

Berikut merupakan persentase tiap-tiap kehilangan panas yang terjadi pada boiler:

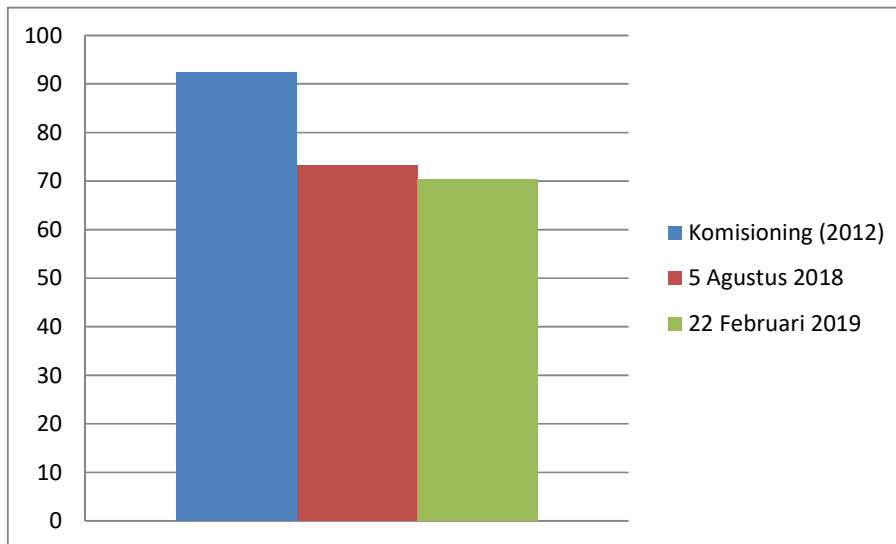


Gambar 4.2 Diagram kehilangan panas yang terjadi pada boiler unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

4.2 Pembahasan

4.2.1 Metode Langsung

Berdasarkan hasil analisis perhitungan efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung maka didapatkan data sebagai berikut:



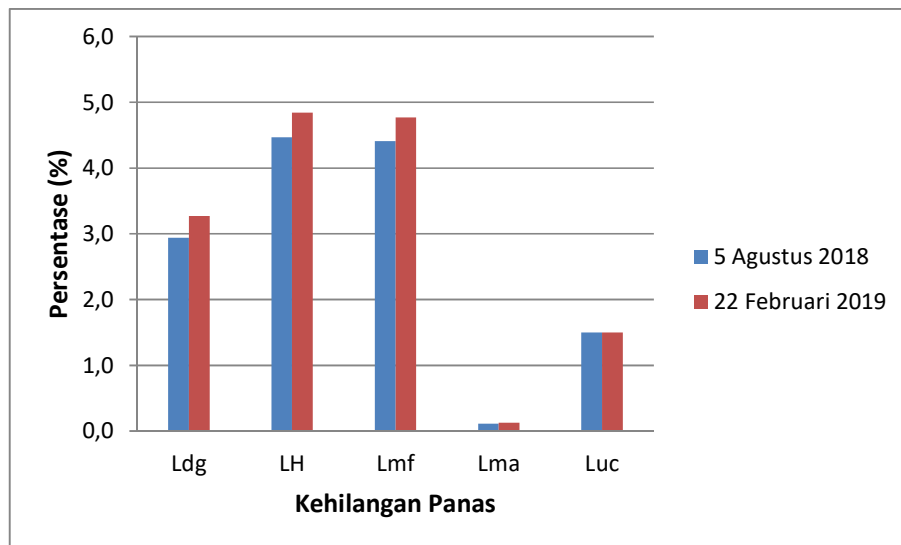
Gambar 4.3. Grafik perbandingan efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto menggunakan metode langsung pada saat komisioning dengan kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

Berdasarkan Gambar 4.3 diatas efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto dengan metode langsung mengalami penurunan sebesar 19,03% dan 21,87% pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 dari efisiensi boiler saat komisioning sebesar 92,27%. Efisiensi boiler pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 sebesar 73,24% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 efisiensi boiler sebesar 70,40%. Menurunnya efisiensi boiler diakibatkan oleh bertambahnya jumlah bahan bakar batubara yang digunakan untuk membangkitkan energi yang sama. Terjadi peningkatan jumlah konsumsi batubara sebesar 1,04 ton/jam. Pada 5

Agustus 2018 konsumsi batubara sebesar 60,94 ton/jam menjadi 61,98 ton/jam pada 22 Februari 2019.

4.2.2 Metode Tidak Langsung

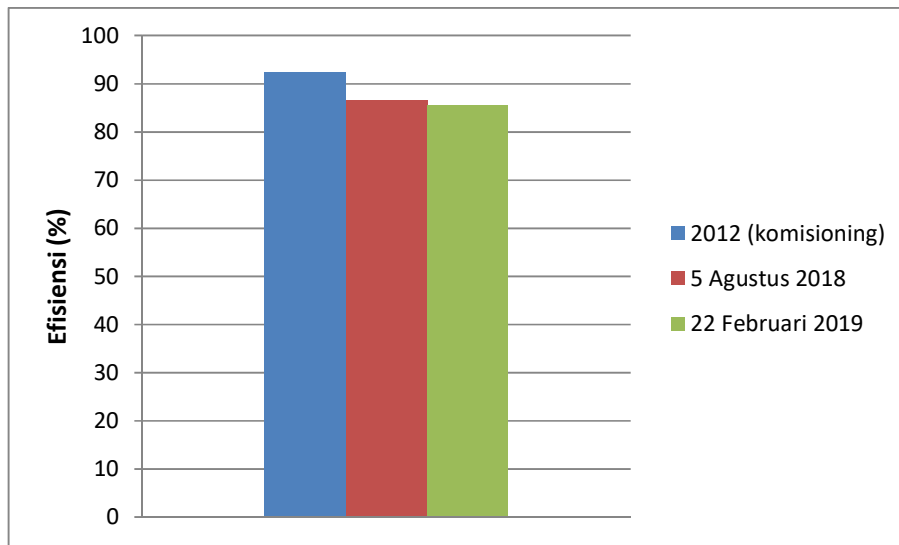
Berdasarkan hasil analisis perhitungan efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung maka didapatkan data sebagai berikut:



Gambar 4.4. Grafik perbandingan persentase kehilangan panas boiler unit 1 PLTU Jenepono pada kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

Berdasarkan Gambar 4.4 diatas didapatkan hasil bahwa faktor kehilangan panas terbesar disebabkan karena adanya H_2 dalam bahan bakar, penguapan air dalam bahan bakar, dan diakibatkan oleh gas buang yang kering. Dapat diamati juga bahwa terjadi peningkatan nilai kehilangan panas sebesar 1,09%, dimana saat kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 total kehilangan panas sebesar 13,43% sedangkan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 total kehilangan panas sebesar 14,52%.

Dibawah ini merupakan perbandingan efisiensi boiler dari saat komisioning tahun 2012 dan kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dengan kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto menggunakan metode tidak langsung pada saat komisioning dengan kondisi operasi 5 Agustus 2018 dan kondisi operasi 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

Berdasarkan Gambar 4.5 diatas, menunjukkan bahwa efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto mengalami penurunan sebesar 5,7% pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan 6,79% pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 dari efisiensi boiler saat komisioning sebesar 92,27%. Pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 efisiensi boiler sebesar 86,57% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 efisiensi boiler sebesar 85,48%.

Efisiensi boiler dipengaruhi oleh kehilangan panas yang terjadi pada boiler. Kehilangan panas terbesar pertama yang mempengaruhi efisiensi boiler

yaitu disebabkan karena faktor adanya H_2 dalam bahan bakar (L_H). Unsur hidrogen dalam bahan bakar batu bara sangat mempengaruhi kinerja boiler, semakin besar kadar hidrogen dalam bahan bakar batubara maka semakin tinggi pula persentase kehilangan panasnya, didapatkan pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 kandungan hidrogen pada batubara sebesar 3,4% menyebabkan kehilangan panas sebesar 4,47% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 kandungan hidrogen pada batubara sebesar 3,8% menyebabkan kehilangan panas sebesar 4,84%. Panas yang seharusnya digunakan untuk menguapkan air pada boiler sebagian hilang karena penguapan air disebabkan unsur hidrogen pada batubara.

Kehilangan panas terbesar kedua yang mempengaruhi efisiensi boiler yaitu disebabkan karena penguapan air dalam bahan bakar (L_{mf}). Semakin besarnya fraksi uap atau *moisture fraction* (MF) dalam bahan bakar, maka semakin besar pula kehilangan panas yang terjadi. Panas pembakaran yang seharusnya digunakan untuk penguapan air dalam boiler sebagian digunakan untuk penguapan air dalam bahan bakar batubara. Pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 nilai MF pada batubara yaitu 30,2% yang menyebabkan kehilangan panas sebesar 4,41% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 nilai MF pada batubara yaitu 33,7% yang menyebabkan kehilangan panas sebesar 4,77%.

Kehilangan panas terbesar ketiga yang mempengaruhi efisiensi boiler yaitu disebabkan karena gas buang yang kering. Kerugian ini terjadi karena temperatur gas buang yang masih cukup tinggi setelah melewati *air heater* dibandingkan dengan udara sekitar. Temperatur yang tinggi ini membawa energi

yang masih cukup tinggi, tetapi tidak bisa digunakan lagi pada boiler. Oleh karena itu, temperatur gas buang harus serendah mungkin, walau demikian suhu tersebut tidak boleh terlalu rendah sebab akan mengakibatkan uap air akan mengembun pada dinding cerobong. Hal ini penting untuk batubara yang mengandung sulfur dimana pada suhu rendah akan mengakibatkan korosi titik embun sulfur (UNEP, 2008). Temperatur gas buang setelah *air heater* dijaga diatas 135°C, namun temperatur gas buang keluar *air heater* juga dijaga dibawah 160°C, tujuannya agar tidak merusak lingkungan atau dengan kata lain merusak lapisan ozon (Rian, 2015). Temperatur gas buang pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 adalah 144,54°C yang menyebabkan kehilangan panas sebesar 2,94% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 sebesar 147,4 °C yang menyebabkan kehilangan panas sebesar 3.27%.

Faktor lain yang mempengaruhi efisiensi boiler adalah nilai kalor bahan bakar batu bara yang digunakan. Nilai kalor batubara sangat mempengaruhi terhadap proses pembakaran, semakin tinggi nilai kalor bahan bakar semakin tinggi pula energi yang dihasilkan dan mempengaruhi efisiensi boiler. Pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 nilai kalor batubara adalah 4.486 kkal/kg yang menyebabkan efisiensi boiler sebesar 86,57% dan pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 nilai kalor batubara adalah 4.344 kkal/kg yang menyebabkan efisiensi boiler sebesar 85,48%.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, maka beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

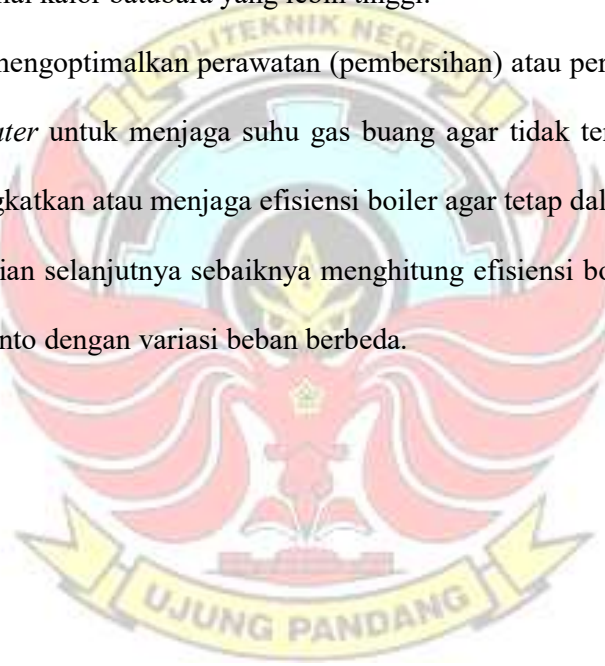
1. Dengan metode langsung, efisiensi boiler Unit 1 PLTU Jeneponto pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan tanggal 22 Februari 2019 masing-masing adalah sebesar 73,24% dan 70,40%.
2. Dengan metode tidak langsung, efisiensi boiler Unit 1 PLTU Jeneponto mengalami penurunan. Efisiensi boiler saat komisioning adalah sebesar 92,27%, sedangkan pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan tanggal 22 Februari 2019 masing-masing adalah sebesar 86,57% dan 85,48%.
3. Nilai kehilangan panas pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 dan 22 Februari 2019 adalah sebagai berikut:
 - Kehilangan panas karena kandungan hidrogen dalam batubara (L_H), adalah sebesar 4,47% dan 4,84%.
 - Kehilangan panas karena penguapan air dalam bahan bakar (L_{mf}), adalah sebesar 4,41% dan 4,77%.
 - Kehilangan panas karena gas buang yang kering (L_{dg}), adalah sebesar 2,94% dan 3,27%.
 - Kehilangan panas karena kadar air dalam udara (L_{ma}) adalah sebesar 0,11% dan 0,13%.

- Kehilangan panas yang tidak terhitung (L_{uc}), adalah sebesar 1,5%.

5.2 Saran

Berikut beberapa saran yang dapat menjadi masukan bagi perusahaan atau pengembangan penelitian berikutnya antara lain sebagai berikut:

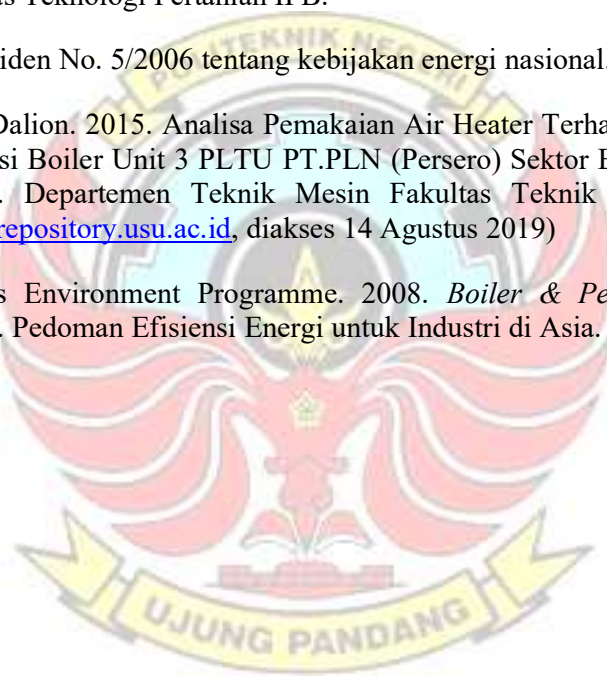
1. Kualitas batubara yang digunakan perlu ditingkatkan, yaitu menggunakan batubara dengan nilai kandungan hidrogen dan *moisture* yang lebih rendah serta nilai kalor batubara yang lebih tinggi.
2. Perlu mengoptimalkan perawatan (pembersihan) atau pergantian pipa-pipa *air heater* untuk menjaga suhu gas buang agar tidak terlalu tinggi untuk meningkatkan atau menjaga efisiensi boiler agar tetap dalam kondisi baik.
3. Penelitian selanjutnya sebaiknya menghitung efisiensi boiler unit 1 PLTU Jeneponto dengan variasi beban berbeda.



DAFTAR PUSTAKA

- Arham, Arsyil dan Septiawan, Muh.Yusuf. 2015. *Evaluasi Kinerja Boiler Combustion Fluidized Bed di PT. PLN (Persero) Unit PLTU Barru*. Skripsi. Makassar: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang
- ASME PTC 4.1. 1998. “*Fired Steam Generation*”. American Standart Mechanical
- Asmudi. 2010. *Analisa Unjuk Kerja Boiler Terhadap Penurunan Daya Pada PLTU PT. Indonesia Power UBP Perak*. Jurnal. Surabaya: Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS. (Online), (<http://digilib.its.ac.id>, diakses 2 Januari 2019)
- Cengel, Y dan M. Boles. 2006. *Thermodynamic An Engineering Approach*. Fifth edition. McGraw-Hill Book. New York. (Online), (<https://crunchiez.files.wordpress.com>, diakses 2 Januari 2019)
- Dewan Energi Nasional (DEN). 2016. *Outlook Energi Indonesia 2016*. Dewan Energi Nasional. Jakarta
- Dewata et al. 2011. *Analisa Teknis Evaluasi Kinerja Boiler Type Ihi Fw Sr Single Drum Akibat Kehilangan Panas Di PLTU PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik*. Jurnal Jurusan Teknik Sistem Perkapalan-Fakultas Teknologi Kelautan-Institut Teknologi Sepuluh Nopember. (Online), (<http://digilib.its.ac.id>, diakses 2 Januari 2019)
- Djokosetyoarjo, MJ. 1999. “*Ketel Uap*”. Pradnya Paramita: Jakarta
- El-Wakil, M.M. 1992. *Instalasi Pembangkit Daya*. Jilid 1. Erlangga. Jakarta
- Ginting, M.H et al. 2014. *Analisa Efisiensi Exergi Boiler Di PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power Semarang – Jawa Tengah*. Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 2, No. 1, Tahun 2014. (Online), (<https://ejournal3.undip.ac.id>, diakses 6 Januari 2019)
- Hendaryati, H. 2012. *Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap Di Pabrik Gula Kebonagung Malang*. Jurnal Gamma, Volume 8, Nomor 1, September 2012: 148 – 153. (Online), (<http://ejournal.umm.ac.id>, diakses 2 Januari 2019)
- Karaeng, Christian Tallu dan Iswandi. 2012. “*Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa*”. Skripsi. Makassar: Jurusan Teknik Mesin Program Studi Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang

- Lakshmi, Vara dan Kishore.S.P. 2015. *Thermal Efficiency of Pulverized fuel boiler*. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. Departmen of Mechanical Engineering, Andhra University Visakhapatnam. (Online), (<https://www.researchgate.net>, diakses 2 Januari 2019)
- M Deni, Surindra. 2013. Analisis Perubahan Efisiensi Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tanjung Jati 1 dan 2, 2x660 MW. Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang
- Nurmalita. 2012. Analisis Efisiensi Energi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Energi Alamraya Semesta di Kabupaten Nagan Raya Nanggroe Aceh Darusalam. Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknologi Pertanian IPB.
- Peraturan Presiden No. 5/2006 tentang kebijakan energi nasional.
- Sinaga, Rian Dalion. 2015. Analisa Pemakaian Air Heater Terhadap Peningkatan Efisiensi Boiler Unit 3 PLTU PT.PLN (Persero) Sektor Belawan. Skripsi. Medan. Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik USU. (Online), (<http://repository.usu.ac.id>, diakses 14 Agustus 2019)
- United Nations Environment Programme. 2008. *Boiler & Pemanas Fluida Termis*. Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia.



LAMPIRAN



Lampiran 1. Data Penelitian

Tabel 1. Data yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 pada beban 100 MW

No.	PARAMETER	NILAI	UNIT
1	<i>Steam Flow</i>	289,99	ton/jam
2	<i>Superheater Outlet Steam Pressure</i>	8,11	MPa
3	<i>Superheater Outlet Steam Temperature</i>	533,24	°C
4	<i>Reheater Inlet Steam Pressure</i>	2	MPa
5	<i>Reheater Inlet Steam Temperature</i>	395,6	°C
6	<i>Reheater Outlet Steam Pressure</i>	2	MPa
7	<i>Reheater Outlet Steam Temperature</i>	522,3	°C
8	<i>Coal Flow</i>	60,94	ton/jam
9	<i>Feed Water Temperature</i>	223,49	°C
10	GCV	4.344	kkal/kg

Sumber : Central Control Room PLTU Jenepono 2x125 MW

Lampiran 1. Data Penelitian (Lanjutan)

Tabel 2. Data yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung pada kondisi operasi tanggal 5 Agustus 2018 pada beban 100 MW

NO.	PARAMETER	SIMBOL	NILAI	SATUAN
1	<i>COAL ANALYSIS :</i>			
	<i>Carbon</i>	C	31,8	%
	<i>Hydrogen</i>	H	3,4	%
	<i>Nitrogen</i>	N	1,1	%
	<i>Sulfur</i>	S	0,10	%
	<i>Oxygen</i>	O	13	%
	<i>Ash Content</i>	ASH	3,1	%
	<i>Moisture</i>	MF	30,2	%
	<i>GCV</i>	GCV	4.344	kcal/kg
2	<i>Ambient Temperature</i>	T _a	33	°C
3	Suhu gas buang	T _g	144,54	°C
4	Persentasi Oxygen		2,53	%
5	Kelembaban Udara	RH	0,02	kg/kg udara kering

Sumber : *Central Control Room PLTU Jenepono 2x125 MW*

Lampiran 1. Data Penelitian (Lanjutan)

Tabel 3. Data yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

No.	PARAMETER	NILAI	SATUAN
1	<i>Steam Flow</i>	289,35	ton/jam
2	<i>Superheater Outlet Steam Pressure</i>	8,26	MPa
3	<i>Superheater Outlet Steam Temperature</i>	532,65	°C
4	<i>Reheater Inlet Steam Pressure</i>	2	MPa
5	<i>Reheater Inlet Steam Temperature</i>	401,7	°C
6	<i>Reheater Outlet Steam Pressure</i>	2	MPa
7	<i>Reheater Outlet Steam Temperature</i>	518,2	°C
8	<i>Coal Flow</i>	61,98	ton/jam
9	<i>Feed Water Temperature</i>	220,8	°C
10	GCV	4.486	kkal/kg

Sumber : *Central Control Room* PLTU Jenepono 2x125 MW

Lampiran 1. Data Penelitian (Lanjutan)

Tabel 4. Data yang digunakan untuk menentukan efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung pada kondisi operasi tanggal 22 Februari 2019 pada beban 100 MW

NO.	PARAMETER	SIMBOL	NILAI	SATUAN
1	<i>COAL ANALYSIS :</i>			
	<i>Carbon</i>	C	31,3	%
	<i>Hydrogen</i>	H	3,8	%
	<i>Nitrogen</i>	N	1,1	%
	<i>Sulfur</i>	S	0,10	%
	<i>Oxygen</i>	O	13	%
	<i>Ash Content</i>	ASH	2,9	%
	<i>Moisture</i>	MF	33,7	%
	<i>GCV</i>	GCV	4.486	kkal/kg
2	<i>Ambient Temperature</i>	T _a	33	°C
3	Suhu gas buang	T _g	147,4	°C
4	Persentasi Oxygen		4,3	%
5	Kelembaban Udara	RH	0,02	kg/kg udara kering

Sumber : *Central Control Room* PLTU Jenepono 2x125 MW

Lampiran 2. Tabel Uap

TABLE A-6

Superheated water (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88°C)				<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96°C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04°C)				
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37°C)				<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11°C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38°C)				
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95°C)				<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85°C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56°C)				
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

Tabel Uap Superheated

Lampiran 2. Tabel Uap (Lanjutan)

922 | Thermodynamics

TABLE A-6

Superheated water (Continued)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35}^\circ\text{C)}$				$P = 4.5 \text{ MPa (257.44}^\circ\text{C)}$				$P = 5.0 \text{ MPa (263.94}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
$P = 6.0 \text{ MPa (275.59}^\circ\text{C)}$				$P = 7.0 \text{ MPa (285.83}^\circ\text{C)}$				$P = 8.0 \text{ MPa (295.01}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
$P = 9.0 \text{ MPa (303.35}^\circ\text{C)}$				$P = 10.0 \text{ MPa (311.00}^\circ\text{C)}$				$P = 12.5 \text{ MPa (327.81}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7229
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819

Tabel Uap Superheated

Lampiran 2. Tabel Uap

TABLE A-7

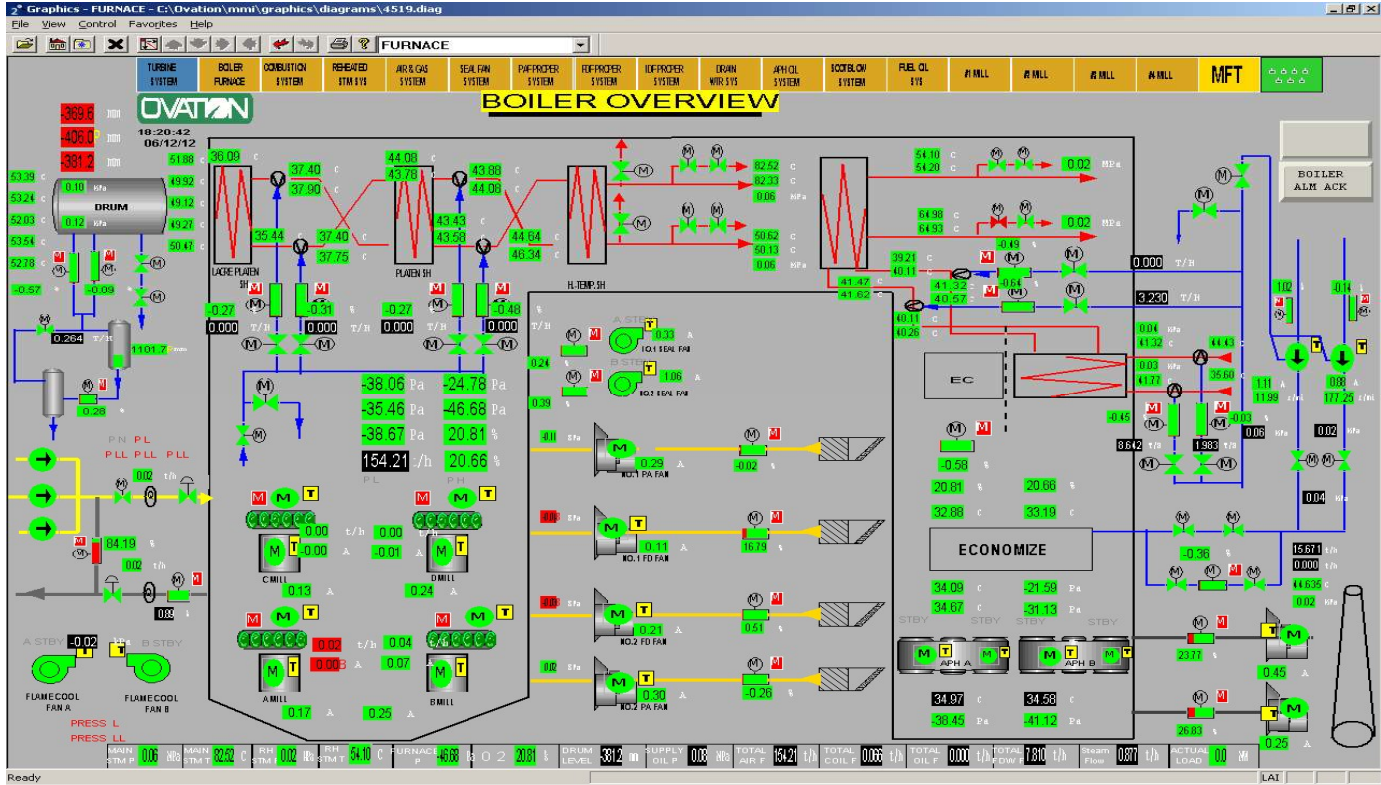
Compressed liquid water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 5 \text{ MPa (263.94}^\circ\text{C)}$				$P = 10 \text{ MPa (311.00}^\circ\text{C)}$				$P = 15 \text{ MPa (342.16}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586
280					0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565	0.0013096	1213.4	1233.0	3.0410
300					0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488	0.0013783	1317.6	1338.3	3.2279
320									0.0014733	1431.9	1454.0	3.4263
340									0.0016311	1567.9	1592.4	3.6555
$P = 20 \text{ MPa (365.75}^\circ\text{C)}$				$P = 30 \text{ MPa}$				$P = 50 \text{ MPa}$				
Sat.	0.0020378	1785.8	1826.6	4.0146	0.0009857	0.29	29.86	0.0003	0.0009767	0.29	49.13	-0.0010
0	0.0009904	0.23	20.03	0.0005	0.0009886	82.11	111.77	0.2897	0.0009805	80.93	129.95	0.2845
20	0.0009929	82.71	102.57	0.2921	0.0009951	164.05	193.90	0.5607	0.0009872	161.90	211.25	0.5528
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0010042	246.14	276.26	0.8156	0.0009962	243.08	292.88	0.8055
60	0.0010084	247.75	267.92	0.8208	0.0010155	328.40	358.86	1.0564	0.0010072	324.42	374.78	1.0442
80	0.0010199	330.50	350.90	1.0627	0.0010290	410.87	441.74	1.2847	0.0010201	405.94	456.94	1.2705
100	0.0010337	413.50	434.17	1.2920	0.0010445	493.66	525.00	1.5020	0.0010349	487.69	539.43	1.4859
120	0.0010496	496.85	517.84	1.5105	0.0010623	576.90	608.76	1.7098	0.0010517	569.77	622.36	1.6916
140	0.0010679	580.71	602.07	1.7194	0.0010823	660.74	693.21	1.9094	0.0010704	652.33	705.85	1.8889
160	0.0010886	665.28	687.05	1.9203	0.0011049	745.40	778.55	2.1020	0.0010914	735.49	790.06	2.0790
180	0.0011122	750.78	773.02	2.1143	0.0011304	831.11	865.02	2.2888	0.0011149	819.45	875.19	2.2628
200	0.0011390	837.49	860.27	2.3027	0.0011595	918.15	952.93	2.4707	0.0011412	904.39	961.45	2.4414
220	0.0011697	925.77	949.16	2.4867	0.0011927	1006.9	1042.7	2.6491	0.0011708	990.55	1049.1	2.6156
240	0.0012053	1016.1	1040.2	2.6676	0.0012314	1097.8	1134.7	2.8250	0.0012044	1078.2	1138.4	2.7864
260	0.0012472	1109.0	1134.0	2.8469	0.0012770	1191.5	1229.8	3.0001	0.0012430	1167.7	1229.9	2.9547
280	0.0012978	1205.6	1231.5	3.0265	0.0013322	1288.9	1328.9	3.1761	0.0012879	1259.6	1324.0	3.1218
300	0.0013611	1307.2	1334.4	3.2091	0.0014014	1391.7	1433.7	3.3558	0.0013409	1354.3	1421.4	3.2888
320	0.0014450	1416.6	1445.5	3.3996	0.0014932	1502.4	1547.1	3.5438	0.0014049	1452.9	1523.1	3.4575
340	0.0015693	1540.2	1571.6	3.6086	0.0016276	1626.8	1675.6	3.7499	0.0014848	1556.5	1630.7	3.6301
360	0.0018248	1703.6	1740.1	3.8787	0.0018729	1782.0	1838.2	4.0026	0.0015884	1667.1	1746.5	3.8102



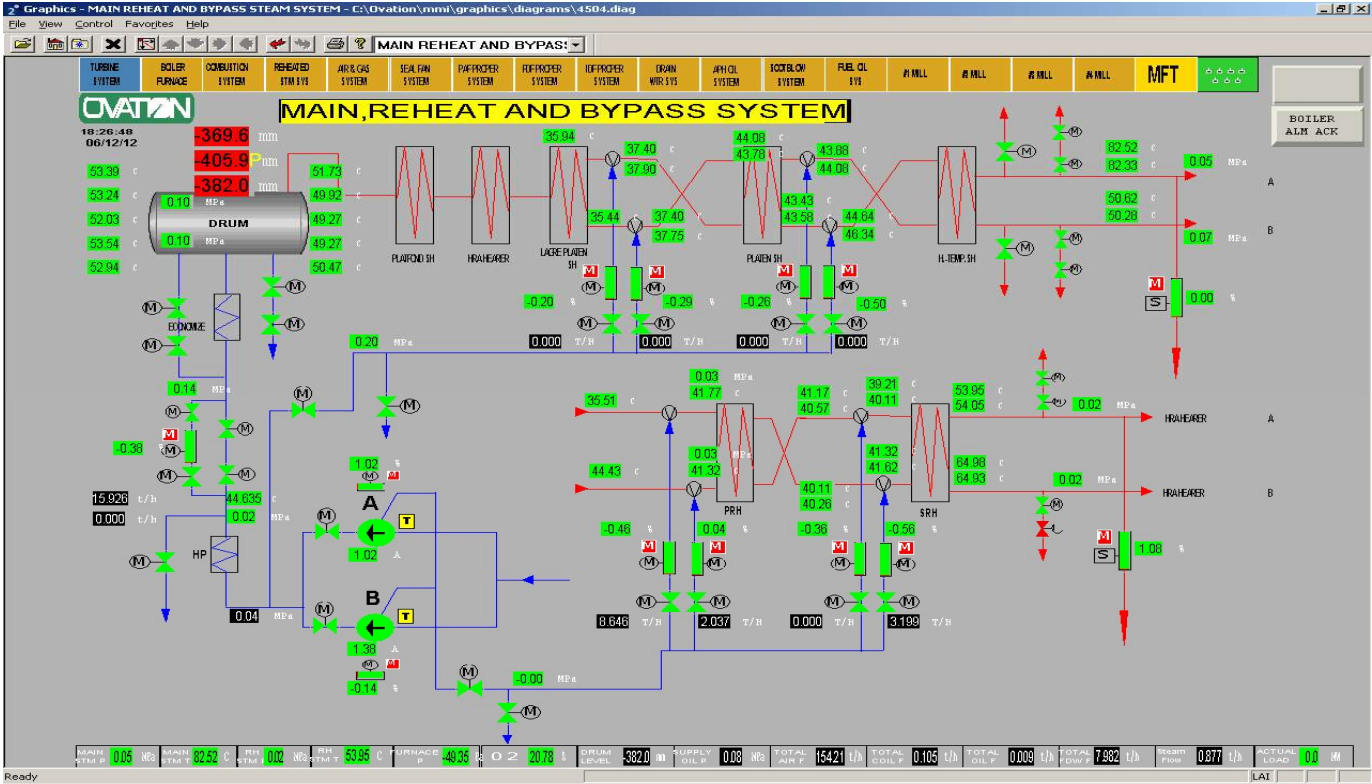
Tabel Uap Compressed Liquid Water

Lampiran 3. Boiler Overview



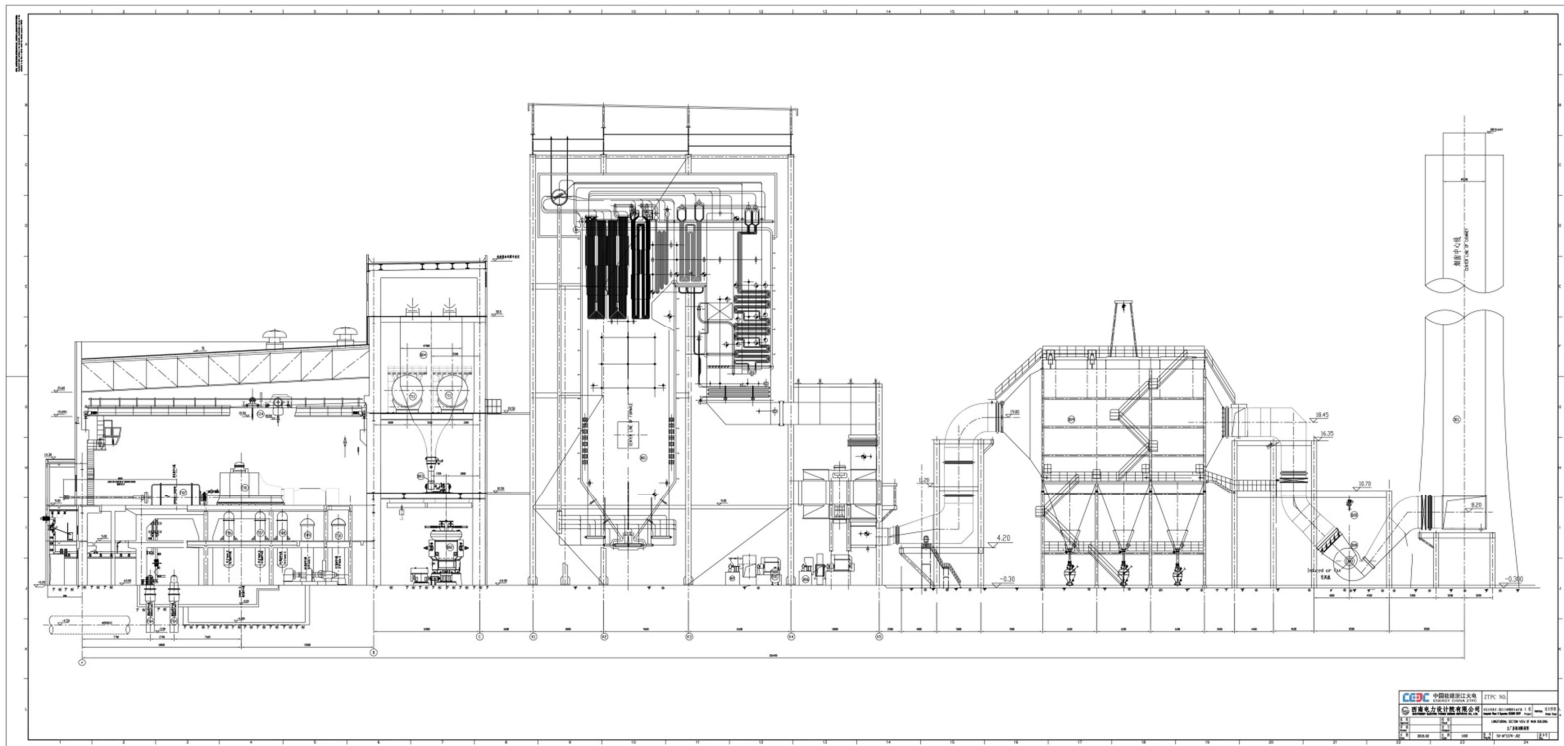
Boiler Overview
 Sumber: Central Control Room PLTU Jeneponto Unit 1

Lampiran 4. Main, Reheat and Bypass System



Main, Reheat and Bypass System
 Sumber: Central Control Room PLTU Jeneponto Unit 1

Lampiran 5. *Plant View of Main Building*



Plant View of Main Building

Sumber: *Manual Book PLTU Jeneponto Unit 1*

Lampiran 6. Hasil Perhitungan Efisiensi Termal saat Komisioning

Report for Boiler Performance Test of Unit 1
一号机组锅炉性能试验报告

表 21: 锅炉热效率计算汇总表

Table 21: Calculated Result of Thermal Efficiency in Different Conditions

项目 PARAMETER	工况 1 CONDITION 1 100%MCR-1		工况 4 CONDITION 4 100%MCR-2		工况 3 CONDITION 3 75%MCR		工况 2 CONDITION 4 50%MCR	
	UCV (HHV/LLV)	CV (HHV/LLV)	UCV (HHV/LLV)	CV (HHV/LLV)	UCV	CV	UCV	CV
总干烟气损失 Heat loss of dry flue gas	5.067 5.437	5.284 5.670	4.898 5.253	5.069 5.436	/	/	/	/
燃料中 H2 燃烧 生成水而造成的 总损失 Heat loss of water from burning hydrogen	2.778 0.160	2.788 0.171	2.740 0.148	2.748 0.157	/	/	/	/
燃料中水分而造 成的总损失 Heat loss of water in fuel	2.995 0.110	3.006 0.122	2.915 0.096	2.923 0.106	/	/	/	/
空气中水分引起 的总损失 Heat loss of moisture in air	0.475 0.509	0.491 0.527	0.456 0.489	0.469 0.503	/	/	/	/
灰渣中碳的造成 的热损失 Heat loss of unburned carbon	0.050 0.053	0.050 0.053	0.041 0.044	0.041 0.044	/	/	/	/
表面对流与辐射 散热损失 Heat loss of surface radiation and convection	0.373 0.400	0.377 0.400	0.377 0.400	0.377 0.400	/	/	/	/
烟气中 CO 引起 的热损失 Heat loss of CO formation	0 0	0 0	0 0	0 0	/	/	/	/
其它未测量热损 Other unmeasured heat loss	0.280 0.300	0.280 0.300	0.280 0.300	0.280 0.300	/	/	/	/
锅炉排烟热损失 Heat loss of flue gas	/	/	/	/	5.832	5.893	6.023	5.971
气体未完全燃烧 热损失 Heat loss of combustible gas	/	/	/	/	0	0	0	0
固体未完全燃烧 热损失 Heat loss of combustible solid	/	/	/	/	0.051	0.051	0.019	0.019
锅炉散热损失 Heat loss of surface radiation and convection	/	/	/	/	0.662	0.662	0.759	0.759

Lampiran 6. Hasil Perhitungan Efisiensi Termal saat Komisioning (Lanjutan)

Report for Boiler Performance Test of Unit 1
 一号机组锅炉性能试验报告

项目 PARAMETER	工况 1 CONDITION 1 100%MCR-1		工况 4 CONDITION 4 100%MCR-2		工况 3 CONDITION 3 75%MCR		工况 2 CONDITION 4 50%MCR	
	UCV (HHV/LLV)	CV (HHV/LLV)	UCV (HHV/LLV)	CV (HHV/LLV)	UCV	CV	UCV	CV
灰渣物理热损失 Heat loss in ash and slag	/	/	/	/	0.024	0.025	0.015	0.015
总热损 Total heat losses	12.015 6.969	12.270 7.243	11.703 6.730	11.904 6.946	6.569	6.630	6.815	6.764
锅炉热效率 Thermal fficiency	87.985 93.031	87.730 92.757	88.297 93.270	88.096 93.054	93.431	93.370	93.185	93.236

UCV: Uncorrected Value;

CV: Corrected Value;

Hasil Perhitungan Efisiensi Termal saat Komisioning
 Sumber: Report of Boiler Performance Test of Unit 1



Lampiran 7. Proses Pengambilan Data



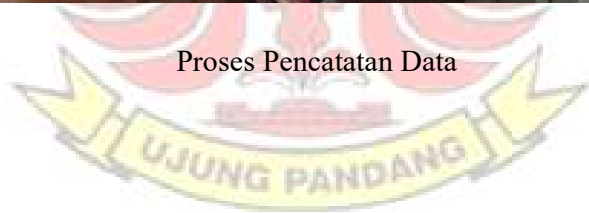
Proses Pengambilan Data



Lampiran 7. Proses Pengambilan Data (Lanjutan)



Proses Pencatatan Data



Lampiran 8. Surat Keterangan Telah Melaksanakan Pengambilan Data

PT BOSOWA ENERGI

JENEPONTO EXISTING COAL FIRED STEAM POWER PLANT 2X125 MW
JENEPONTO EXPANSION COAL FIRED STEAM POWER PLANT 2X135 MW

Jeneponto, 13 September 2019
Ref.: SL/GM/LO-PNUP/IX-19/431

SURAT KETERANGAN

Yang bertandatangan dibawah ini menerangkan bahwa:

M. Ikhsan Muis 442 15 021

Elvi 442 15 008

Masiswa Politeknik Negeri Ujung Pandang Program Study S1 terapan (D4) Teknik Pembangkit Energi, telah melaksanakan pengambilan data pada PLTU Jeneponto dari tanggal 5 Maret 2019 – 24 Mei 2019 berdasarkan surat No: B/472/PL10/PK.03.08/2019 tanggal : 12 Pebruari 2019, dalam rangka penulisan tugas akhir yang berjudul;

"Evaluasi Kinerja Boiler PLTU Unit 1 Jeneponto"

Demikian surat keterangan ini kami berikan untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Hormat Kami,

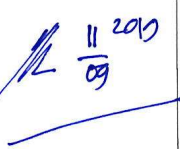





MUCHAMAD MUSLICH
General Manager


LEMBAR REVISI JUDUL SKRIPSI

Nama : M. Ikhsan Muis / Elvi
 NIM : 44215021 / 44215008

Catatan Daftar Revisi Penguji :

No	Nama	Uraian	Tanda Tangan
1.	Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D Musrady Mulyadi, S.T.M.T.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisi penulisan pd hal 59 (font huruf) ✓ - Perlu tambahan data untuk mendapatkan efisiensi dengan metode tidak langsung (data kehilangan panas) / hal. 56 ✓ - Tambahkan data untuk perhitungan metode langsung & komisioning (Hal 57) ✓ - Revisi kesimpulan ke-3, cantumkan perbandingan sesuai dg tujuan ket 3 ✓ 	
2.	Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D	<ul style="list-style-type: none"> - Revisi Tinjauan Pustaka - Buatlah skema proses di boiler (hal. 11) - Ganti gambar pada hal: 44 - Bedakan penulisan imbuhan di- dan kata depan di- (sbg tempat) - cek ulang persamaan pd hal. 47 - Revisi gambar pd hal. 42 - Perbaiki penulisan pd persamaan 2. - Revisi Ringkasan - Revisi Pendahuluan - Revisi Bab I, Bab II, Bab III, Kesimpulan, dan Daftar Pustaka 	
3.	Gusri E.A	<ul style="list-style-type: none"> - Revisi Ringkasan - Revisi Pendahuluan - Revisi Bab I, Bab II, Bab III, Kesimpulan, dan Daftar Pustaka 	
4.	Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D	<ul style="list-style-type: none"> - Cek kembali perhitungan pada metode langsung - Tambahkan input data dari reheater - Lengkapi diagram yang ada reheater nya 	

Makassar, 21/8/2019
 Ketua / Sekretaris Panitia Ujian Sidang,


 Gusri Emiyati Ali
 NIP. _____

Catatan: Jika ada perubahan Judul Tugas Akhir konfirmasi secepatnya ke bagian Akademik.