

**PENGARUH TEMPERATUR AIR UMPAN BOILER DAN
NILAI KALOR BAHAN BAKAR TERHADAP
EFESIENSI BOILER**

SKRIPSI

OLEH:

**ANDI WIJAYA BANGUN
178130016**



**PROGAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

HALAMAN JUDUL

PENGARUH TEMPERATUR AIR UMPAN BOILER DAN NILAI KALOR BAHAN BAKAR TERHADAP EFESIENSI BOILER

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Medan Area



OLEH :

ANDI WIJAYA BANGUN
178130016

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal : Pengaruh Temperatur Air Umpan Boiler Dan Nilai Kalor Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Boiler

Nama Mahasiswa : Andi Wijaya Bangun

NPM : 178130016

Bidang Keahlian : Konversi Energi

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing

(Muhammad Idris, ST, MT)
Dosen Pembimbing I

(Ir. H. Amirsyam Nasution, MT)
Dosen Pembimbing II

(Dr. Rahmad Syah, S.Kom, M.Kom)
Dekan

(Muhammad Idris, ST, MT)
Ka.Prodi

Tanggal Lulus : 12 April 2023

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai sorma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 12 April 2023



Andi Wijaya Bangun
NPM 178130016

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

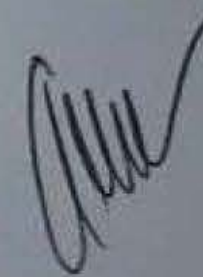
Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Andi Wijaya Bangun
Npm : 178130016
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Pengaruh Temperatur Air Umpan Boiler dan Nilai Kalor Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Boiler, beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.
Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Medan, 12 April 2023

Hormat Saya,



Andi Wijaya Bangun
NPM 178130016

ABSTRAK

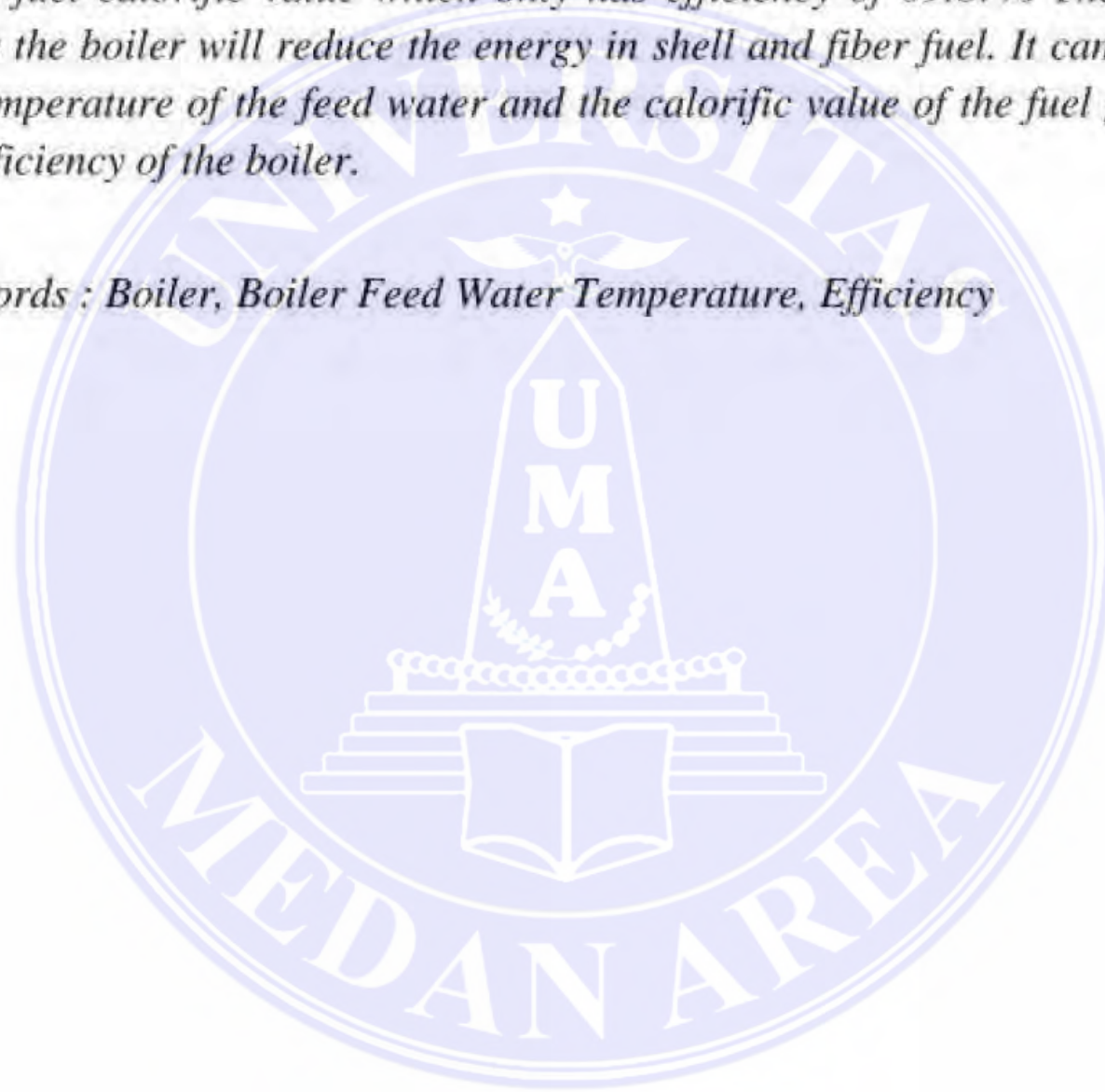
Air merupakan zat yang sangat dibutuhkan, termasuk kegunaannya untuk kebutuhan energi dan pemanas dalam suatu proses produksi di industri. Kebutuhan energi dan panas di industri sebagian memanfaatkan steam (uap panas) yang dihasilkan oleh boiler. Industri pengolahan minyak sawit menggunakan air umpan boiler untuk menghasilkan uap untuk pengolahan minyak sawit. Entalpi pada air umpan 60°C yaitu 253,28 kJ/kg dan perbandingan entalpi pada air umpan suhu 90°C yaitu 379,17 kJ/kg. Dan hal ini terlihat dari hasil penelitian yang telah dilakukan untuk energi dengan suhu air umpan 60°C dan nilai kalor bahan bakar yang memiliki efisiensi 73,31% lebih besar dibandingkan energi dengan suhu air umpan 90°C dan nilai kalor bahan bakar yang hanya memiliki efisiensi sebesar 69,87%. Energi yang masuk ke boiler akan mengurangi energi pada bahan bakar shell dan fiber. Terlihat bahwa suhu air umpan dan nilai kalor bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi boiler.

Kata Kunci : Boiler, Suhu Air Umpan Boiler, Efisiensi

ABSTRACT

Water is a substance that is needed, including its use for energy and heating needs in an industrial production process. Energy and heat needs in industry partly utilize steam (hot steam) produced by boilers. The palm oil processing industry uses boiler feed water to generate steam for palm oil processing. The enthalpy for 60°C feed water is 253.28 kJ/kg and the enthalpy ratio for 90°C feed water is 379.17 kJ/kg. And this can be seen from the results of research that has been carried out for energy with a feed water temperature of 60°C and a fuel calorific value which has an efficiency of 73.31% greater than energy with a feed water temperature of 90°C and a fuel calorific value which only has efficiency of 69.87% The energy that enters the boiler will reduce the energy in shell and fiber fuel. It can be seen that the temperature of the feed water and the calorific value of the fuel greatly affect the efficiency of the boiler.

Keywords : Boiler, Boiler Feed Water Temperature, Efficiency



RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Andi Wijaya Bangun dilahirkan di Binjai pada tanggal 30 Juli 1998. Penulis merupakan anak kelima dari 5 bersaudara, pasangan dari Alm Raskita Bangun dan Masita Br Sembiring Kembaren. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 053960 Maryke, Kecamatan Kutambaru Kabupaten Langkat Sumatera Utara dan tamat pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama SMP Negeri 7 Binjai dan Tamat pada Tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Binjai Sumatera Utara dan Tamat pada tahun 2016. Pada tahun 2017 penulis terdaftar menjadi mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area. Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di PT. Amal Tani Tanjung Putri Kabupaten Langkat Sumatera Utara pada tahun 2021. Dan tamat dari Universitas Medan Area pada tahun 2023.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Yang Maha Kuasa atas segala karunianya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Penulis menyusun Tugas Akhir ini dengan judul “ Pengaruh Temperatur Air Umpan Boiler dan Nilai Kalor Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Boiler ”.

Terimakasih penulis sampaikan kepada Bapak Muhammad Idris , ST, MT dan Bapak Ir. H. Amirsyam Nasution , MT selaku pembimbing yang telah memberikan banyak saran. Tidak lupa juga penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah turut memberikan kontribusi dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Tentunya, tidak akan bisa maksimal jika tidak mendapatkan dukungan dari berbagai pihak. Ungkapan terimakasih juga disampaikan kepada Ayah Alm. Raskita Bangun dan Ibu Masita Sembiring Kembaren, serta seluruh keluarga atas doa dan perhatiannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua yang membacanya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

Medan, 12 April 2023

Penulis,



Andi Wijaya Bangun

NPM 178130016

DAFTAR ISI

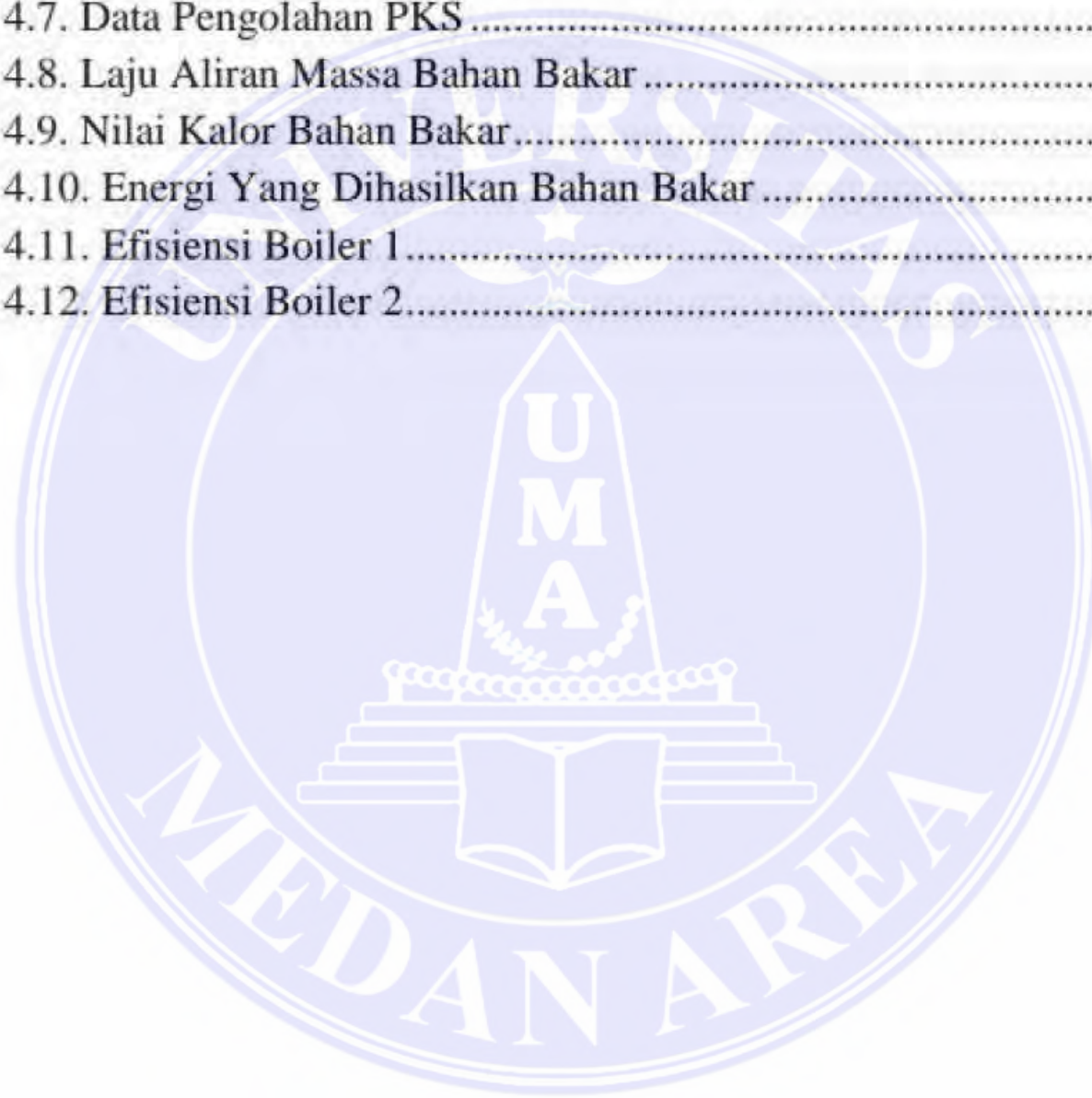
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
ABSTRAK.....	v
RIWAYAT HIDUP.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Hipotesis Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Air Umpan Boiler	4
2.1.1. Persyaratan Air Umpan Boiler.....	5
2.1.2. Pengolahan Air Umpan Boiler.....	6
2.1.3. Deaerator.....	7
2.2. Pengertian Boiler	9
2.2.1. Fungsi Boiler.....	10
2.2.2. Klasifikasi Boiler	11
2.2.3. Komponen Boiler.....	13
2.2.4. Sistem Boiler.....	15
2.3. Kalor	15
2.3.1. Nilai Kalor Bahan Bakar.....	16
2.3.2. Bahan Bakar Boiler.....	17
2.4. Efisiensi Boiler.....	20
2.5. Siklus Rankine	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1. Tempat Dan Waktu	27
3.2. Alat Penelitian.....	27
3.3. Langkah Pengujian	28
3.4. Diagram Alir Penelitian	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil.....	31

4.1.1	Pengukuran Suhu Air Umpan.....	31
4.1.2	Pengukuran Nilai Kalor Bahan Bakar	34
4.1.3	Pengukuran Pada Boiler.....	35
4.2	Pembahasan	36
4.2.1	Perbandingan Suhu Pada Air Umpan	36
4.2.2.	Perbandingan Nilai Kalor Bahan Bakar Fiber Cangkang	38
4.2.3	Perbandingan Pengaruh Boiler	39
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		41
5.1.	Simpulan	41
5.2.	Saran	41
LAMPIRAN.....		42
DAFTAR PUSTAKA		46



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Baku Mutu Air Umpan Boiler	6
Tabel 3.1. Waktu Pelaksanaan Penelitian	27
Tabel 4.1. Operasi Boiler Temperatur Air umpan 60°C.....	31
Tabel 4.2. Entalpi Spesifik Dan Volume Spesifik	31
Tabel 4.3. Unjuk Kerja Boiler Pada Temperatur Air Umpan 60°C.....	32
Tabel 4.4. Operasi Boiler Pada Temperature Air umpan 90°C	33
Tabel 4.5. Entalpi Spesifik Dan Volume Spesifik	33
Tabel 4.6. Unjuk Kerja Boiler Temperatur Air Umpan 90°C.....	34
Tabel 4.7. Data Pengolahan PKS	34
Tabel 4.8. Laju Aliran Massa Bahan Bakar	34
Tabel 4.9. Nilai Kalor Bahan Bakar.....	35
Tabel 4.10. Energi Yang Dihasilkan Bahan Bakar.....	35
Tabel 4.11. Efisiensi Boiler 1.....	36
Tabel 4.12. Efisiensi Boiler 2.....	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Deaerator Tray-type.....	7
Gambar 2.2. Deaerator Spray-type.....	8
Gambar 2.3. Boiler Pipa Api.....	11
Gambar 2.4. Boiler Pipa Air.....	12
Gambar 2.5. Komponen-komponen Boiler.....	13
Gambar 2.6. Cangkang Sawit.....	18
Gambar 2.7. Fiber Kelapa Sawit.....	19
Gambar 2.8. Rangkaian Siklus Rankine dan Diagram T-s.....	24
Gambar 3.1. <i>Infrared Digital Thermometer</i>	28
Gambar 3.2. Boiler PKS PT. Amal Tani.....	28
Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 4.1. Entalpi Pada Air Umpan dan Uap Boiler.....	37
Gambar 4.2. Perubahan Entalpi Pada Suhu 60°C.....	37
Gambar 4.3. Perubahan Entalpi Pada Suhu 90°C.....	38
Gambar 4.4. Nilai Kalor Bahan Bakar.....	38
Gambar 4.5. Energi Dihasilkan Bahan Bakar.....	39
Gambar 4.6. Efisiensi Boiler Percobaan 1.....	39
Gambar 4.7. Efisiensi Boiler Percobaan 2.....	40
Gambar 4.8. Perbandingan Efisiensi Pengaruh Air Umpan Dan Nilai Kalor.....	40

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengukuran Suhu Air Umpan.....	42
Lampiran 2. Pengukuran Nilai Kalor Bahan Bakar.....	44
Lampiran 3. Efisiensi Boiler Dari Suhu Air Umpan Dan Nilai Kalor.....	45



DAFTAR NOTASI

c	= Kalor jenis
h	= Nilai interpolasi entalpi (kJ/kg)
h_1	= Entalpi air umpan (kJ/kg)
h_2	= Entalpi air yang di pompa (kJ/kg)
h_3	= Entalpi uap lanjut (kJ/kg)
h_4	= Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)
HV	= Nilai kalor (kJ/kg)
m	= Massa benda (kg)
\dot{m}	= Laju massa aliran air (kg/s)
\dot{m}_{bb}	= Laju massa bahan bakar (kg/detik)
\dot{m}_{fuel}	= Laju massa bahan bakar masuk boiler (kg/detik)
\dot{m}_{steam}	= Laju aliran massa uap boiler (kg/s)
\dot{m}_{tbs}	= Laju aliran massa tandan buah segar (kg/detik)
p_1	= Tekanan awal (kPa)
p_2	= Tekanan akhir (kPa)
$P_{m_{bb}}$	= Persentase massa bahan bakar (%)
Q	= Kalor (J)
Q_1	= Energi bahan bakar yang diproduksi (kW)
Q_2	= Jumlah energi bahan bakar masuk boiler (kW)
Q_{bb}	= Energi bahan bakar yang masuk ke boiler (kW)
Q_{in}	= Energi yang diserap boiler (kW)
s	= Entropi (kJ/kg)
T	= Suhu ($^{\circ}C$)
T_1	= Suhu awal
T_2	= Suhu Akhir
v	= Volume spesifik (kJ/kg)
W_{pompa}	= Kerja pompa (kW)
W_{turbin}	= Kerja turbin (kW)
Δt	= Perubahan suhu
η	= Efisiensi boiler (%)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Air merupakan zat yang sangat dibutuhkan termasuk pemanfaatannya untuk kebutuhan energi dan pemanasan dalam suatu proses produksi di industri. Kebutuhan energi dan panas di industri sebagian memanfaatkan *steam* (uap panas) yang di hasilkan boiler. Industri pengolahan kelapa sawit menggunakan air umpan boiler untuk menghasilkan uap pada pengolahan kelapa sawit. Air yang digunakan untuk air umpan boiler dapat diperoleh dari air sungai, air waduk, sumur bor, dan sumber mata air lainnya, dimana kualitas dari air tersebut tidak sama walaupun menggunakan sumber air sejenis, ini karena di pengaruhi oleh kandungan asam mata air tersebut. Namun air dari sumber-sumber tersebut harus diolah terlebih dahulu, karena air umpan boiler yang digunakan untuk menghasilkan *steam* ini harus tidak mengandung mineral atau garam biasanya berupa garam *bikarbonat*, *klorida*, *sulfat*, *nitrat*, *silikat*, *kalsium sulfat*, dan *karbonat* yang bisa menyebabkan korosi, pengendapan, dan terbentuknya kerak di dalam boiler. Pengendapan material dapat mengakibatkan menurunnya efektifitas perpindahan panas sehingga menyebabkan bahan bakar menjadi boros. Untuk mengurangi masalah-masalah pada sistem boiler yang dapat disebabkan oleh air umpan, maka air untuk umpan boiler harus dilakukan pengolahan *water treatment* sesuai dengan spesifikasi atau standar air umpan boiler [1].

Nilai kalor merupakan energi kalor yang dilepaskan bahan bakar pada waktunya terjadi oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut. Bahan bakar adalah zat kimia yang apabila direaksikan dengan oksigen (O_2) akan menghasilkan sejumlah kalor. Bahan bakar dapat berwujud gas, cair, maupun padat. Selain itu, bahan bakar merupakan suatu senyawa yang tersusun atas beberapa unsur seperti karbon (C), hidrogen (H), belerang (S), dan nitrogen (N) [2].

Adanya limbah hasil produksi pabrik kelapa sawit yang dapat digunakan untuk bahan bakar boiler yaitu fiber dan cangkang. Fiber dan cangkang adalah salah satu contoh bahan bakar padat yang digunakan pada boiler. Bahan bakar ini

merupakan keluaran ataupun output yang dihasilkan dari pengolahan pabrik kelapa sawit [3].

Dapat diketahui bahwa syarat bahan bakar boiler harus lah memiliki nilai kalor yang cukup untuk mengubah air menjadi uap, serta nilai kalor bahan bakar sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler itu sendiri [4]

Berdasarkan uraian singkat diatas, saya selaku penulis tertarik untuk meneliti tentang **Pengaruh Temperatur Air Umpan Boiler Dan Nilai Kalor Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Boiler** dan mengangkat masalah ini menjadi bahan penulisan saya.

1.2. Perumusan Masalah

Kondisi air umpan yang dipanaskan dengan tidak benar, terjadi ketika air umpan yang masuk ke boiler tidak cukup panas. Pemanasan yang tidak tepat menghasilkan efisiensi lebih rendah, daerasi mekanis yang tidak lengkap, dan dapat menyebabkan retak dan kegagalan besar pada saluran air umpan. Hal-hal yang mempengaruhi efisiensi boiler adalah bahan bakar dan kualitas air umpan boiler. Parameter-parameter yang mempengaruhi kualitas air umpan boiler antara lain, Oksigen terlarut dalam jumlah yang tinggi dapat menyebabkan korosi pada peralatan boiler. Berdasarkan uraian singkat diatas rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana nilai kalor bahan bakar dan entalpi temperatur air umpan yang masuk ke boiler?
2. Bagaimana pengaruh dari temperatur air umpan dan nilai kalor bahan bakar fiber dan cangkang terhadap bolier?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisa nilai kalor dan temperatur air umpan yang masuk ke boiler untuk mengetahui unjuk kerja boiler.
2. Mengukur pengaruh nilai kalor bahan bakar dan temperatur air umpan pada boiler.

1.4. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian ini untuk memberikan kontribusi pemikiran atau menambah informasi perkembangan pengolahan industri dan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja dan efisiensi boiler.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini untuk mengetahui seberapa besar pengaruh temperatur air umpan boiler dan nilai kalor bahan bakar fibre dan cangkang terhadap efisiensi boiler di pabrik pengolahan kelapa sawit.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air Umpan Boiler

Air umpan adalah air yang disuplai ke boiler untuk dirubah menjadi steam. Sedangkan sistem air umpan adalah sistem penyediaan air secara otomatis untuk boiler sesuai dengan kebutuhan *steam*. Sistem air umpan yang dimiliki boiler untuk menghasilkan steam harus memenuhi spesifikasi dan syarat tertentu sehingga dapat digunakan sebagai umpan boiler. Dengan menggunakan pompa air pengisian ketel atau *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) air umpan boiler dipompakan dari luar masuk ke dalam boiler dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan kerja maksimum di dalam boiler [5].

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penanganan air umpan boiler, yaitu :

1. Scale Forming (zat yang menyebabkan kerak)

Jika air dididihkan dan dihasilkan steam, padatan terlarut yang terdapat dalam air akan tertinggal di boiler. Jika terdapat banyak padatan dalam air umpan, padatan tersebut akan mengendap. Apabila padatan telah mencapai tingkat konsentrasi tertentu, adanya padatan mendorong terbentuknya busa dan menyebabkan terbawanya air ke steam. Endapan juga mengakibatkan terbentuknya kerak di bagian dalam boiler, sehingga mengakibatkan pemanasan setempat menjadi berlebih dan akhirnya menyebabkan kegagalan pada pipa boiler. Oleh karena itu diperlukan pengendalian tingkat konsentrasi padatan dalam air yang dididihkan. Caranya dengan melakukan blow down, dimana sejumlah air dikeluarkan dan diganti dengan air umpan.

2. Zat-Zat yang Dapat Menyebabkan Korosi

Larutan-larutan asam dan gas-gas yang terlarut dalam air dapat menyebabkan korosi pada boiler. Air umpan ketel uap harus memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan agar tidak menimbulkan masalah-masalah pada pengoperasian ketel uap yang berkesinambungan. Air tersebut harus bebas dari mineral-mineral yang tidak diinginkan serta pengotor-pengotor lainnya yang dapat menurunkan efisiensi kerja dari ketel uap.

2.1.1 Persyaratan Air Umpan Boiler

Boiler atau ketel uap merupakan sebuah alat untuk pembangkit uap dimana uap ini berfungsi sebagai zat pemindah tenaga kalor. Tenaga kalor yang dikandung dalam uap dinyatakan dengan entalpi panas.

1. Hal-hal yang mempengaruhi efisiensi boiler adalah bahan bakar dan kualitas air umpan boiler. Parameter-parameter yang mempengaruhi kualitas air umpan boiler antara lain: Oksigen terlarut, dalam jumlah yang tinggi dapat menyebabkan korosi pada peralatan boiler.
2. Kekeruhan, dapat mengendap pada perpipaan dan peralatan proses serta mengganggu proses.
3. PH. Bila tidak sesuai dengan standar kualitas air umpan boiler dapat menyebabkan korosi pada peralatan
4. Kesadahan, merupakan kandungan ion Ca dan Mg yang dapat menyebabkan kerak pada peralatan serta perpipaan boiler sehingga menimbulkan local overheating.
5. Fe, dapat menyebabkan air bewarna dan mengendap disaluran air dan boiler bila teroksidasi oleh oksigen

Secara umum air yang akan digunakan sebagai umpan boiler adalah air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan terjadinya endapan yang dapat membentuk kerak pada boiler dan air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan korosi boiler, korosi menjadi salah satu masalah yang sangat lazim terjadi pada boiler, bahkan dapat dikatakan bahwa tidak ada boiler yang tidak mengalami korosi karena boiler menggunakan media air yang jika tidak diperhatikan, akan sangat mudah mengkorosi pipa-pipa boiler [6].

Air murni yang hanya tersusun oleh molekul H_2O dan tanpa ada zat lain yang terlarut di dalamnya, bersifat korosif. Zat-zat lain yang terlarut di dalam air lah yang menjadi salah satu pemicu air memiliki sifat korosif. Oksigen menjadi salah satu gas yang mudah larut di dalam air dan menjadi penyebab utama terjadinya korosi pada pipa-pipa boiler. Tabel 2.1 berikut ini merupakan persyaratan baku mutu air umpan boiler.

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Umpan Boiler

Paramater	Satuan	Ukuran
pH	Unit	10.5-11.5
Conductivity	$\mu\text{mhos/cm}$	5000,max
TDS	Ppm	3500,max
P-Alkalinity	Ppm	-
M-Alkalinity	Ppm	800, max
O-Alkalinity	ppm	2,5 x SiO ₂ , min
T.Hardness	Ppm	-
Silica	Ppm	150,max
Besi	Ppm	2,max
Phosphat residual	Ppm	-
Sulfite residual	Ppm	20-50
pHcondensate	Unit	8.0-9.0

2.1.2 Pengolahan Air Umpan Boiler

Untuk mencegah terjadinya masalah-masalah yang timbul pada boiler, maka air umpan yang akan digunakan sebelum masuk ke boiler, harus diolah terlebih dahulu, pengolahan air ini meliputi :

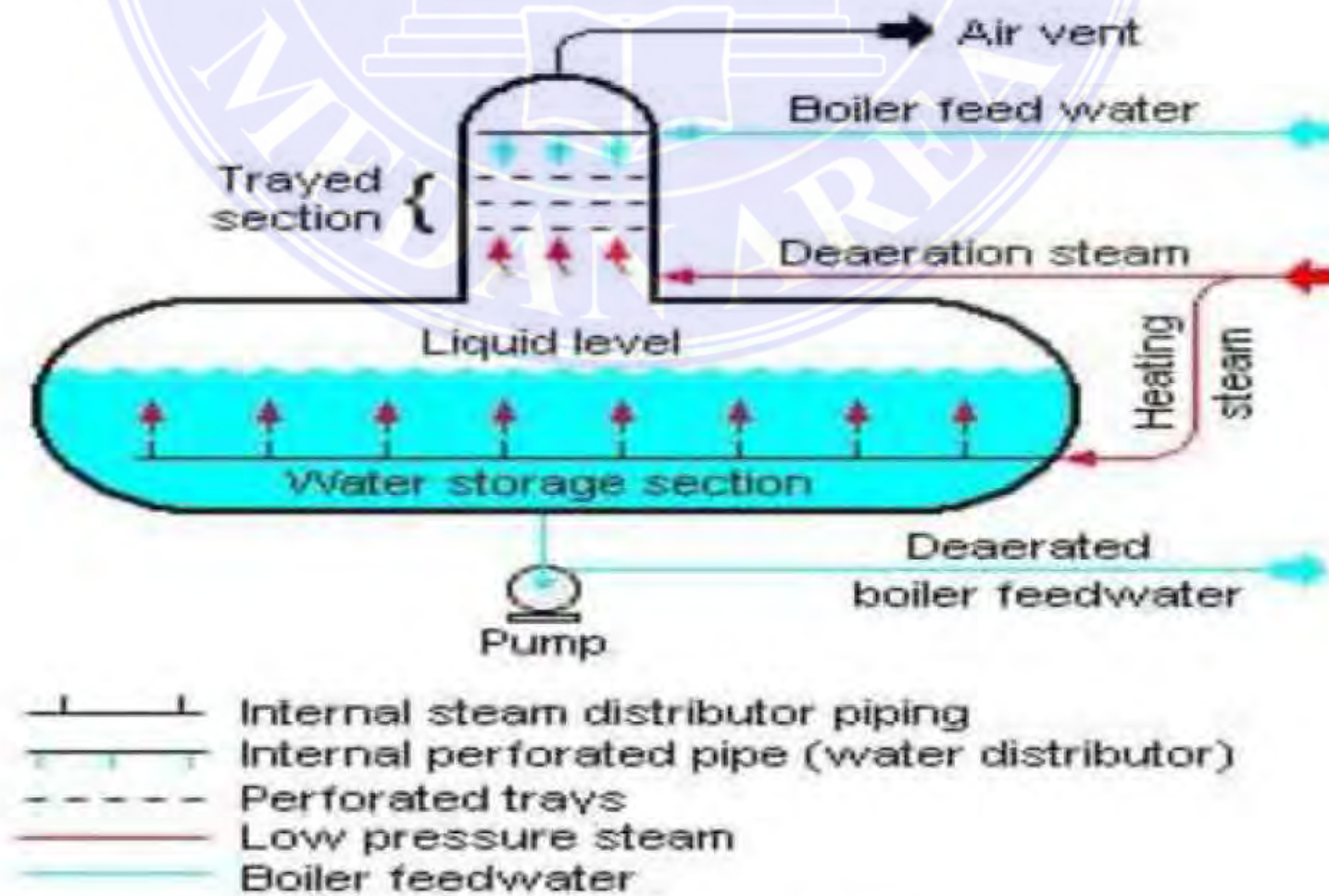
1. Pengolahan eksternal, digunakan untuk membuang padatan tersuspensi, padatan terlarut (terutama ion kalsium dan magnesium yang merupakan penyebab utama pembentukan kerak) dan gas terlarut (oksigen dan karbon dioksida). Proses Perlakuan eksternal yang ada adalah :
 - a. Pertukaran ion
 - b. De-aerasi (mekanis dan kimia)
 - c. Osmosis balik
 - d. Penghilangan mineral dan demineralisasi
2. Pengolahan internal, adalah pengolahan air didalam boiler dengan cara pembubuhan/penambahan bahan-bahan kimia (*chemicals*) ke dalam boiler dengan maksud untuk mencegah terjadi endapan kerak, korosi dan sebagainya di dalam boiler. Para ahli berpendapat bahwa antara pertreatment dan internal treatment harus saling menunjang agar hasil yang dicapai sesuai apa yang diharapkan dimana pipa-pipa api/air tidak mengalami endapan sehingga transfer panas dari panas ke air mencapai tingkat efisiensi yang tinggi Sebelum digunakan cara diatas, perlu membuang padatan dan warna dari bahan baku air, sebab bahan tersebut dapat mengotori resin yang digunakan pada bagian pengolahan berikutnya.

2.1.3 Deaerator

Deaerator berfungsi sebagai pemanas air umpan karena prinsip kerja yang digunakan dalam penghilangan kadar oksigen dan gas-gas tak terkondensasi menggunakan kontak langsung antara uap ekstraksi turbin tekanan menengah sebagai media pemanasnya dengan air umpan. Deaerator disebut sebagai pemanas air umpan tipe langsung (*open feedwater heater*), karena dalam proses pemanasannya terjadi kontak langsung (pencampuran) antara uap pemanas dari ekstraksi turbin tekanan menengah dengan air umpan yang masuk ke dalam tangki pemanas deaerator. Selain itu, kontrol temperature air keluar deaerator yang mendekati titik didihnya (belum sampai mendidih) pada nilai tekanan tangki deaerator tertentu dapat berfungsi untuk mencegah terjadinya kavitasi pada boiler feed pump [7].

Selain sebagai pemanas air umpan, fungsi deaerator adalah sebagai media penghilang gas-gas tak terkondensasi di dalam air umpan pengisi boiler, dimana air umpan sebelum masuk ke tangki pemanas deaerator diinjeksikan zat kimia terlebih dahulu yang disebut hydrazine. Ada dua tipe dasar dari deaerator sebagai berikut.

1. Tray-type, termasuk juga *vertical domed deaeration* yang dipasang di atas sebuah *horizontal vessel* yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan air hasil dari proses deaerasi. Gambar 2.1 berikut ini merupakan deaerator tray-type.



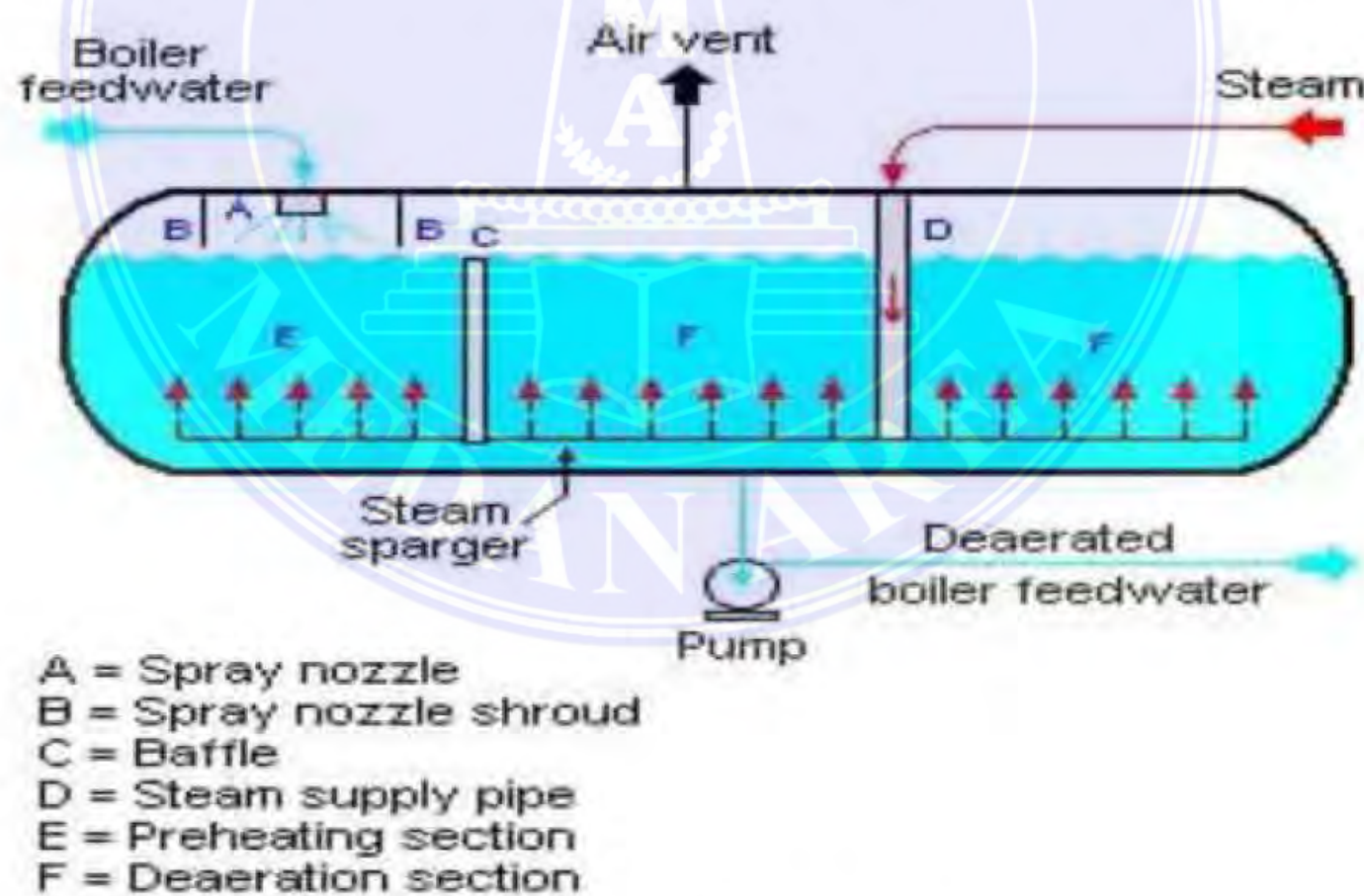
Gambar 2.1. Deaerator Tray-type

Vertical domed deaeration dipasang diatas *horizontal vessel*. *Boiler feedwater* memasuki bagian *vertical domed deaeration* diatas *perforated trays* dan mengalir kebawah melalui *tray* tersebut. *Low-pressure deaeration steam* memasuki bawah *tray* dan mengalir ke atas *tray* tersebut.

Gas terlarut yang terkandung pada *feedwater* akan keluar melalui *vent* dibagian atas *vertical deaeration*. *Feedwater* yang sudah murni atau tidak mengandung unsur O₂ dan gas lainnya akan mengalir ke dalam *Horizontal vessel* dan dipompa ke *steam drum* untuk pembangkit *steam*. *Low-pressure deaeration steam*, yang mengalir didalam *sparger pipe* dibawah *horizontal vessel*, disediakan untuk menjaga *feedwater boiler* tetap terjaga temperaturnya. Insulasi eksternal dari *horizontal vessel* tersebut biasanya disediakan untuk meminimalkan kehilangan panas.

2. Spray-type

Spray type hanya terdiri dari sebuah *horizontal / vertical vessel* yang berfungsi baik sebagai bagian proses deaerasi dan sebagai tangki penyimpanan *feedwater* murni. Gambar 2.3 dibawah ini merupakan deaerator spray-type.



Gambar 2.2. Deaerator Spray-type

Memiliki bagian pemanas (E) dan bagian proses deaerasi (F). Dua bagian ini dipisahkan oleh penyekat (C). *Low-pressure deaeration steam* memasuki vessel melalui *steam sparger* di bawah vessel. *Feedwater* disemprotkan ke bagian (E) dimana di panaskan oleh uap yang naik dari sparger. Tujuan dari nozzle semprotan

air umpan (A) dan bagian pemanasan awal adalah untuk memanaskan *feedwater* dengan suhu saturasi untuk memudahkan proses pengeluaran gas terlarut di bagian *deaeration*.

Feedwater yang sudah dipanaskan kemudian mengalir ke bagian *deaeration* (F), dimana akan di *deaerated* oleh uap yang naik dari sistem sparger. Gas-gas kontaminan akan keluar melalui lubang di bagian atas vessel. *Boiler feedwater* yang sudah di deaerasi akan dipompa dari dasar vessel ke sistem pembangkit uap boiler.

2.2 Pengertian Boiler

Boiler/ketel uap merupakan suatu alat untuk mengubah air menjadi uap air yang memiliki tekanan dan temperatur tertentu yang selanjutnya akan digunakan untuk proses pemanasan atau untuk di konversi menjadi tenaga penggerak. Untuk melakukan proses tersebut tentunya diperlukan proses pembakaran bidang-bidang tertentu pada ketel uap tersebut. Bahan Bakar yang di gunakan bermacam-macam dari yang populer batubara, cangkang dan fiber, minyak bakar, listrik, gas, sampah, dan lain-lain. Ketel Uap adalah merupakan bagian terpenting dari penemuan teknologi yang merupakan pemicu lahirnya revolusi industry [8].

Catatan yang paling awal ditemukannya ketel uap adalah pada tahun 75 masehi oleh ahli matematika dan fisika dari alexandria bernama Heros. Dalam tiga bukunya dia menulis tentang mekanik dan sifat-sifat udara serta memperkenalkan rancangan sebuah mesin uap sederhana yang dikenal dengan nama eolipile. Prinsip kerja dari mesin eolipile ini adalah terdiri dari tabung ketel yang dihubungkan dengan bola baja ber nozel, dengan uap yang keluar dari nozel tersebut bola baja bisa berputar. Metode eolipile inilah yang menjadi dasar perkembangan mesin-mesin uap selanjutnya. Selanjutnya penemuan demi penemuan semakin berkembang mulai dari Geovanni battista tahun 1538-1615 yang mengenalkan uap sebagai media menjadikan tabung hampa. Denis papin tahun 1647-1712 yang mengenalkan alat berupa steam digester, Thomas savery tahun 1650-1715 yang pertama kali yang membuat mesin pompa air uap dengan sistem vacum dan tekan dan masih banyak lagi.

Perkembangan Teknologi pada masa sekarang ini, Ketel uap sudah merupakan salah satu komponen yang sangat penting pada suatu sistem industri. Ketel uap memberikan kontribusi yang besar dalam sistem mekanisme

pembangunan dengan memanfaatkan sumber daya alam untuk kepentingan manusia. Kebutuhan Ketel uap memegang peranan dalam dunia industri seperti dalam pabrik pengolahan kelapa sawit pada pabrik pengolahan kelapa sawit (PKS), ketel uap berperan memproduksi uap untuk proses pemanasan, perebusan dan pengeringan dalam proses produksinya.

Energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem boiler memiliki nilai tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan steam 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 steam 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 merubah energi kalor menjadi energi mekanik kemudian memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik (power boilers) [9].

2.2.1 Fungsi Boiler

Secara umum boiler merupakan suatu peralatan yang di gunakan untuk menghasilkan (steam) dalam berbagai keperluan. Air didalam ketel uap dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah di banding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air didalam ketel uap. Air yang memilki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar.

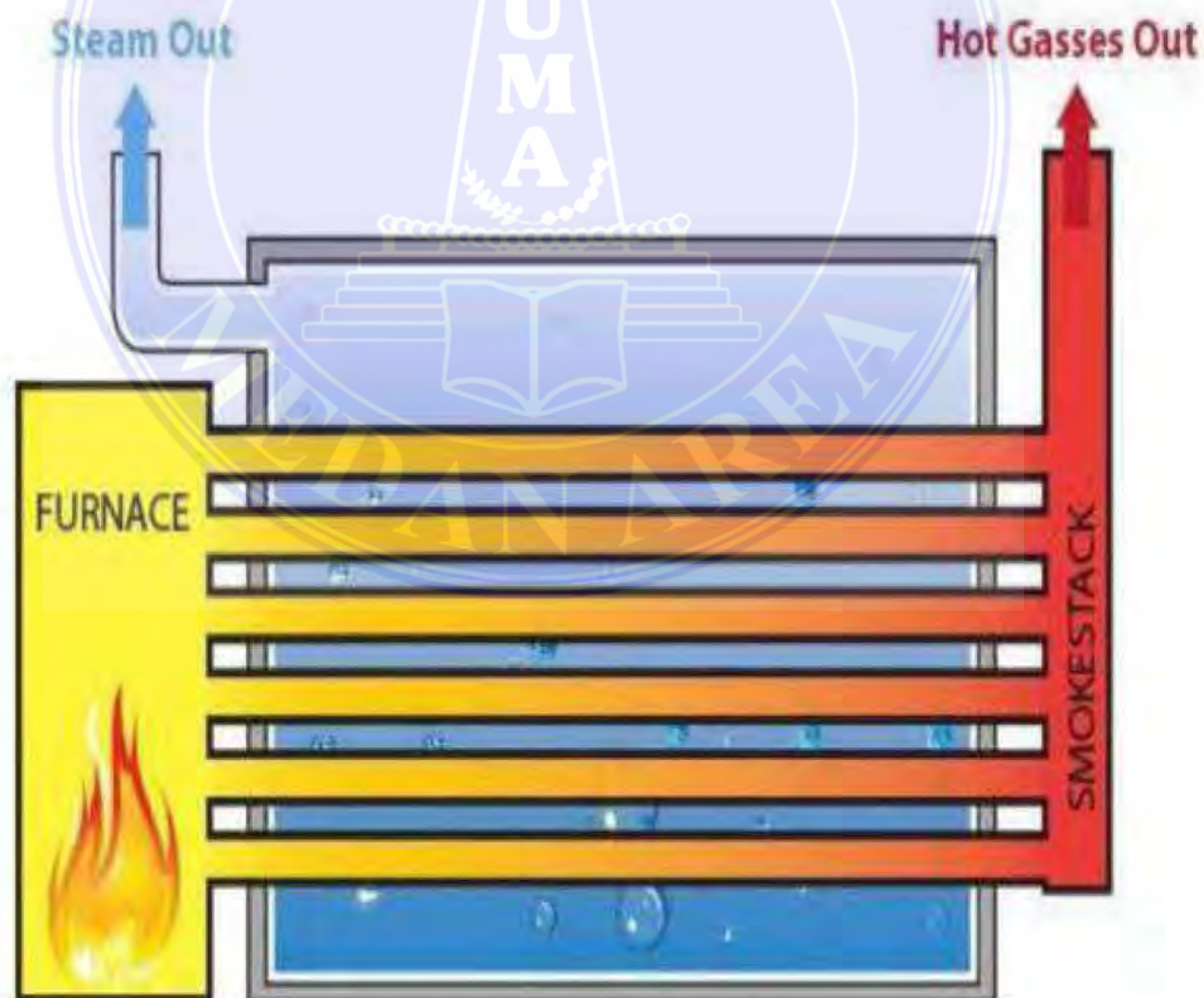
Fungsi dari boiler adalah menghasilkan uap yang digunakan untuk kebutuhan proses pabrik dan membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik maupun perumahan karyawan di sekitar pabrik. Adanya pengaruh pengotoran baik yang ditimbulkan dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler. Klasifikasi Boiler secara umum dibagi dua yaitu boiler pipa api dan boiler pipa air. Jenis boiler pipa api banyak digunakan oleh industri yang memerlukan tekanan uap yang relatif rendah, misalnya pabrik-pabrik gula. Sedangkan jenis pipa air digunakan oleh industri/pembangkit listrik yang memerlukan tekanan uap yang tinggi [10].

2.2.2 Klasifikasi Boiler

Seiring dengan perkembangan teknologi dan evaluasi dari produk boiler berdasarkan nilai emisi gas buang yang mencemari lingkungan, maka berikut klasifikasi boiler berdasarkan fluida yang mengalir, yaitu:

1. Fire tube boiler (ketel pipa api)

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa-pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa-pipa api tersebut. Pipa - pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan, volume air kira - kira $\frac{3}{4}$ dari tangki ketel. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan vertikal dari pembakaran diantara furnace dan pipa-pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah. Gambar 2.5 berikut ini merupakan boiler pipa api.



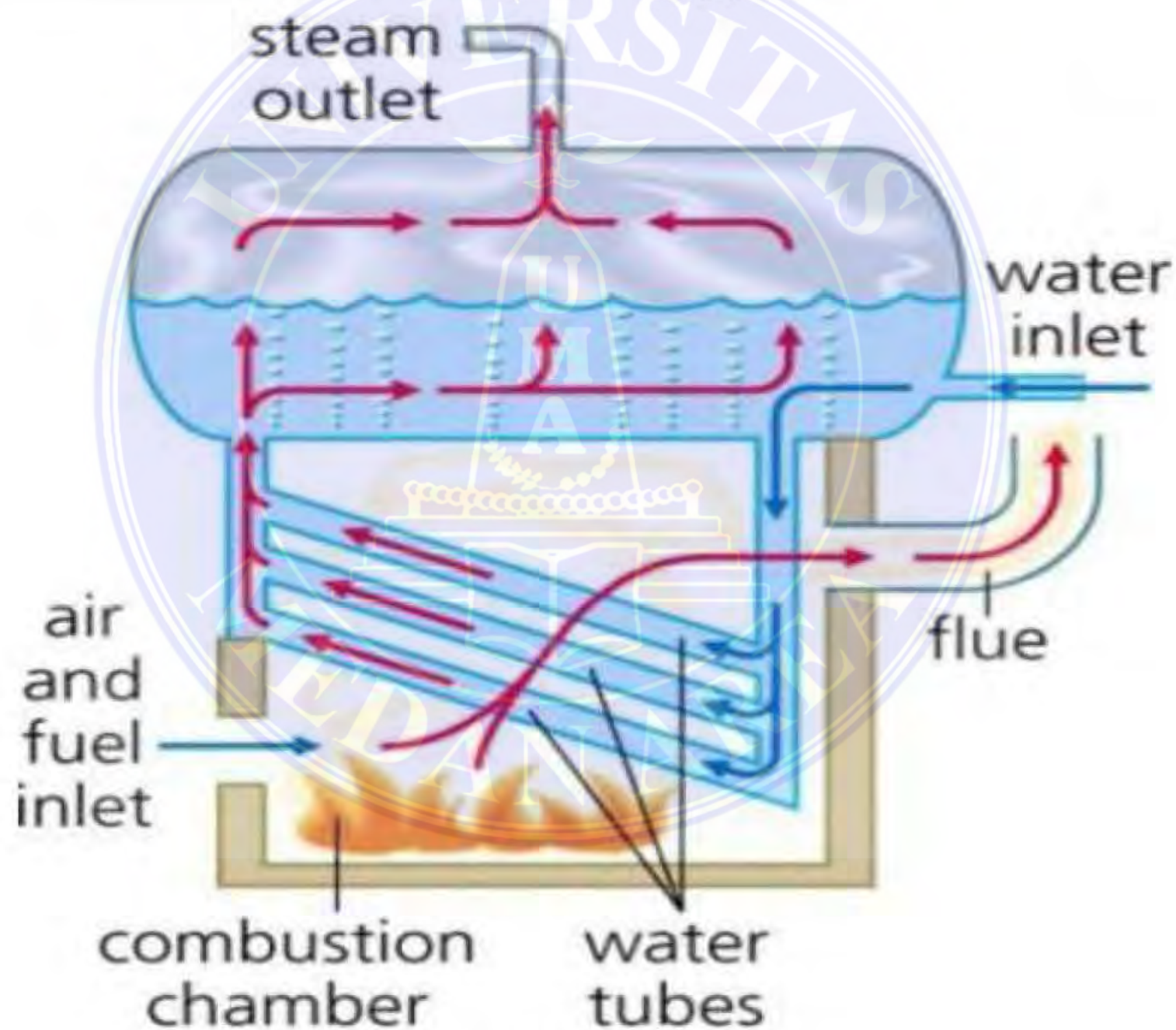
Gambar 2.3. Boiler Pipa Api

Keuntungan boiler pipa api, yaitu, tidak membutuhkan air isian boiler dengan kualitas yang tinggi, konstruksi sederhana sehingga perawatan lebih mudah, endapan lumpur lebih mudah dibersihkan,

Kelemahan boiler pipa api, yaitu, pemanasan awal membutuhkan waktu lama, tekanan uap yang dihasilkan rendah, kapasitas uap yang dihasilkan kecil.

2. Water tube boiler (ketel pipa air)

Pada Ketel pipa air, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum, air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk steam pada daerah uap dalam drum, ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Gambar 2.4 berikut ini merupakan boiler pipa air.



Gambar 2.4. Boiler Pipa Air

Untuk ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel pipa air sebagai berikut:

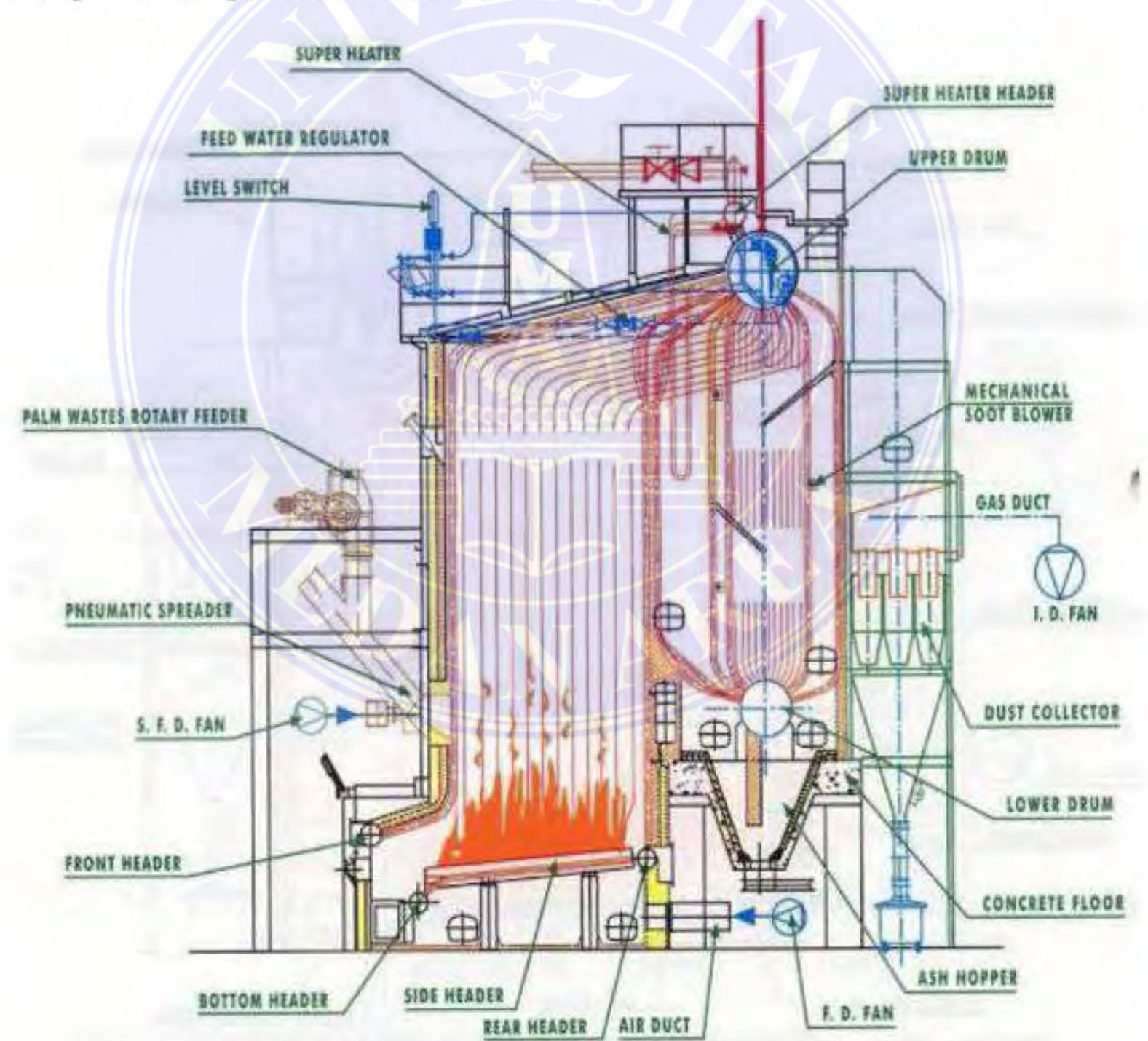
- Force, induce dan balance draft membantu untuk meningkatkan efisiensi.
- Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari pengolahan air.
- Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.

Keuntungan boiler pipa air, yaitu, sanggup bekerja dengan tekanan tinggi, berat boiler yang relatif ringan, kapasitas yang besar, dapat dioperasikan dengan cepat, jadi dalam waktu yang singkat telah dapat memproduksi uap.

Kelemahan dari boiler pipa air, yaitu, konstruksi boiler sudah tidak sederhana lagi, sehingga perawatan lebih sulit dilakukan, menuntut air isian harus selalu bersih, agar tidak terjadi pembentukan batu ketel, perencanaan lebih sulit sehingga harganya mahal.

2.2.3 Komponen Boiler

Komponen boiler adalah seperangkat alat atau unit proses yang merupakan bagian dari boiler, setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda, dan terhubung dengan komponen lainnya sesuai alur prosesnya. Gambar 2.5 berikut ini merupakan komponen-komponen dari boiler .



Gambar 2.5. Komponen-komponen Boiler

Boiler tersusun dari berbagai macam komponen dengan fungsinya masing-masing, secara umum komponen utama boiler terdiri dari :

1. Ruang Bakar (Furnace)

Yaitu tempat terjadinya pembakaran ampas dan minyak atau bahan bakar yang lain. Suhu di dalam ruang bakar berkisar 600°C tergantung dari zat kering bahan bakar. Untuk mendapatkan suhu ruang bakar yang tinggi perlu pengaturan dari udara hembus dan umpan bahan bakar. Untuk pembuangan abu masing-masing ketel menggunakan dumping grade, dan langsung di goreng agar tidak mengganggu proses pembakaran.

2. Baggase Feeder

Digunakan sebagai pengumpan ampas agar masuknya ampas ke dalam ruang bakar secara kontinu dan merata. pemasukan ampas menggunakan rotary valve dengan mengatur bukaan pintu ampas.

3. Main steam drum

Sebagai tempat masuk air dan sirkulasi air panas karena pembakaran sehingga terbentuk uap.

4. Super heater

Cara kerjanya yaitu uap yang keluar dari upper drum ketel dimasukkan ke dalam pipa-pipa yang kemudian masuk ke dalam ruang bakar dan uap berubah menjadi uap kering.

5. Oil burner

Sebagai pembakaran tambahan dalam ketel dengan residu.

6. Penangkap debu (*Dust collector*)

Fungsinya sebagai penangkap debu sebelum gas asap keluar dari cerobong agar tidak terjadi polusi udara di lingkungan. Ketel pipa air menggunakan penangkap debu yaitu dengan cara dispray dengan air. Gas sisa pembakaran ditarik IDF, sehingga terjadi pusaran di spray dengan air disekelilingnya. Butiran-butiran abu yang halus akan jatuh ke talang bersama air lalu ke penampung abu.

7. Economizer

Ekonomiser adalah piranti yang digunakan untuk memanaskan air umpan dengan memanfaatkan panas dari gas asap sebelum masuk ke cerobong.

8. Force draft fan (FDF)

Berfungsi sebagai penghembus campuran uap bahan bakar dan gas-gas dan udara di dalam ruang bakar.

9. Induce draft fan (IDF)

Berfungsi untuk membuang atau menghisap gas-gas berikut campuran uap bahan bakar dan udara yang terdapat di dalam ruang bakar.

10. Valves, control, dan instrument

Sebagai instrument pengaman serta control terhadap tekanan, temperatur, water level dsb.

11. Deaerator

Pemisah gas-gas terlarut dalam air (O₂) dan memanaskan air umpan boiler sebelum dibakar di dalam boiler.

12. Feed water heater

Sistem pemanasan awal pada air pengisi ketel

13. Blowdown system

Blowdown kontinu yang tidak terkendali sangatlah sia-sia. Pengendalian blowdown otomatis dapat terpasang yang merupakan sensor dan merespon pada konduktivitas air boiler dan pH. Blowdown 10 % dalam boiler 15 Kg/cm² menghasilkan kehilangan efisiensi 3%.

2.2.4 Sistem Boiler

Sistem boiler terdiri dari sistem air umpan, sistem steam, dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan dari sistem air umpan, penanganan air umpan diperlukan sebagai bentuk pemeliharaan untuk mencegah terjadi kerusakan dari sistem steam. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran 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 system.

2.3 Kalor

Kalor adalah tenaga panas yang dapat diterima dan diteruskan oleh satu benda ke benda lain secara hantaran (konduksi), penyinaran (radiasi), atau aliran (konveksi). Kalor juga disebut sebagai energi yang berpindah dari benda bersuhu

lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah. Dalam satuan internasional, kalor dinyatakan dengan Joule (J), satuan lainnya dikenal dengan kalori (kal) yang biasa digunakan dibidang gizi. Satu kalori adalah jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 gram air hingga naik sebesar 1 derajat selsius ($^{\circ}\text{C}$), satu kalori = 4,184 J atau sering dibulatkan menjadi 4,2 J [11].

Kalor didefinisikan juga sebagai energi panas yang dimiliki oleh suatu zat, untuk mendeteksi adanya kalor yang dimiliki oleh suatu benda umumnya dilakukan dengan mengukur suhu benda tersebut. Air panas jika dibiarkan lama-kelamaan akan dingin, sebab kalor yang ada didalamnya dilepaskan ke lingkungan sekitar air, yang mempengaruhi kenaikan atau penurunan suhu benda adalah jumlah kalor, massa benda dan jenis benda. Secara alami, kalor dengan sendirinya berpindah dari yang bersuhu tinggi menuju benda yang bersuhu rendah. Perpindahan kalor cenderung menyamakan suhu benda yang saling bersentuhan.

Pada abad ke 18, para fisikawan menduga bahwa aliran kalor merupakan gerakan suatu fluida, suatu jenis fluida yang tidak kelihatan, fluida adalah zat yang dapat mengalir. Fluida meliputi zat cair dan zat gas. Air (zat cair) termasuk fluida karena dapat mengalir. Udara juga termasuk fluida karena dapat mengalir, fluida tersebut dinamakan caloric, teori mengenai caloric tidak digunakan lagi karena berdasarkan hasil dari percobaan, keberadaan caloric ini tidak bisa dibuktikan.

2.3.1 Nilai Kalor Bahan Bakar

Besarnya entalphy reaksi dapat dinyatakan dengan kalor pembakaran atau disebut juga nilai kalor. Nilai kalor dari bahan bakar menurut Sneed dan Kerr (1969) adalah energi yang dapat dibebaskan selama proses pembakaran yang komplek dari sejumlah bahan bakar. Nilai kalor ini dapat diukur sebagai nilai kalor kotor (gross calorific value) dan nilai kalor netto (nett calorivic value). Nilai kalor kotor mengasumsikan seluruh uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran sepenuhnya terkondensasi menjadi cair. Sedangkan nilai kalor netto mengasumsikan air yang keluar dari produk pembakaran tidak sepenuhnya terkondensasi. Menurut Koesoemadinata (1980), nilai kalor bahan bakar adalah jumlah panas yang dihasilkan atau ditimbulkan oleh suatu gram bahan bakar tersebut dengan meningkatkan temperatur 1 gr air dari 3,50 C – 4,50 C, dengan satuan kalori. Dengan kata lain nilai kalor adalah besarnya panas yang diperoleh

dari pembakaran suatu jumlah tertentu bahan bakar. Semakin tinggi berat jenis bahan bakar, maka semakin tinggi nilai kalor yang diperolehnya. Adapun untuk menghitung nilai kalor pada bahan bakar menggunakan persamaan 2.1 berikut.

$$Q = m \times c \times \Delta t \dots \dots \dots \text{(Pers.2.1)}$$

dimana :

- Q = Kalor (J)
- m = Massa benda (kg)
- c = Kalor jenis
- Δt = $T_1 - T_2$ = perubahan suhu
- T_1 = Suhu awal
- T_2 = Suhu Akhir

2.3.2 Bahan Bakar Boiler

Agar kualitas uap yang yang dihasilkan dari ketel uap sesuai dengan diinginkan atau dibutuhkan maka di perlukan sejumlah panas untuk menguapkan air tersebut, dimana panas tersebut diperoleh dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar ketel [12].

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna di dalam ketel diperlukan beberapa syarat, yaitu, Perbandingan pemakaian bahan bakar harus sesuai (cangkang dan fiber), udara yang dipakai harus mencukupi, waktu yang diperlukan untuk proses pembakaran harus cukup, panas yang cukup untuk memulai pembakaran, kerapatan yang cukup merambatkan nyala api, dalam hal ini bahan bakar yang digunakan adalah cangkang dan fiber.

Adapun alasan mengapa digunakan cangkang dan fiber sebagai bahan bakar adalah sebagai berikut :

1. Bahan bakar cangkang dan fiber cukup tersedia dan mudah diperoleh dipabrik.
2. Cangkang dan fiber merupakan limbah dari pabrik kelapa sawit apabila digunakan.
3. Nilai kalor bahan bakar memenuhi persyaratan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.
4. Sisa pembakaran bahan bakar dapat digunakan sebagai pupuk untuk tanaman kelapa sawit.

5. Harga lebih ekonomis.

Cangkang adalah sejenis bahan bakar padat yang berwarna hitam berbentuk seperti batok kelapa, terdapat pada bagian dalam pada buah kelapa sawit yang diselubungi oleh serabut. Gambar 2.6 berikut ini merupakan cangkang sawit.



Gambar 2.6. Cangkang Sawit

Pada bahan bakar cangkang ini terdapat berbagai unsur kimia, Carbon (C), Hidrogen (H₂), Nitrogen (N₂), Oksigen (O₂), dan Abu. Dimana unsur kimia yang terkandung pada cangkang mempunyai presentase (%) yang berbeda jumlahnya, bahan bakar cangkang ini setelah mengalami proses pembakaran akan berubah menjadi arang, kemudian arang tersebut dengan adanya udara pada dapur akan terbang sebagai ukuran partikel kecil yang dinamakan partikel pijar. Apabila pemakaian cangkang ini terlalu banyak dari fiber akan menghambat proses pembakaran akibat penumpukan arang dan nyala api kurang sempurna, dan jika cangkang digunakan sedikit, panas yang dihasilkan akan rendah, karena cangkang apabila dibakar akan mengeluarkan panas yang besar .

Fiber adalah bahan bakar padat yang berbentuk seperti rambut, apabila telah mengalami proses pengolahan berwarna coklat muda, serabut ini terdapat dibagian kedua dari buah kelapa sawit setelah kulit buah kelapa sawit, didalam serabut dan

daging buah sawitlah minya CPO terkandung. Gambar 2.7 berikut ini merupakan fiber kelapa sawit.



Gambar 2.7. Fiber Kelapa Sawit

Panas yang dihasilkan fiber jumlahnya lebih kecil dari yang di hasilkan oleh cangkang, oleh karena itu perbandingan lebih besar fiber dari pada cangkang. Disamping fiber lebih cepat habis menjadi abu apabila dibakar, pemakaian fiber yang berlebihan akan berdampak buruk pada proses pembakaran karena dapat menghambat proses perambatan panas pada pipa *water wall*, disamping mempersulit pembuangan dari pintu *ekspansion door* (pintu keluar untuk abu dan arang) akibat terjadinya penumpukan yang berlebihan.

Pemakaian uap untuk proses pengolahan kelapa sawit di perlukan lebih banyak. Sehingga di perlukan biomasa yang cukup dan yang dapat langsung digunakan untuk peroses penguapan air pada boiler. Jumlah Bahan bakar fiber dan cangkang yang tersedia pada PKS dengan kapasitas 8,33 kg/detik dapat di hitung dengan persamaan 2.2 berikut untuk menentukan laju massa bahan bakar.

$$\dot{m}_{bb} = P_{m_{bb}} \times \dot{m}_{tbs} \dots \dots \dots (Pers.2.2)$$

dimana :

- \dot{m}_{bb} = Laju massa bahan bakar (kg/detik)
- $P_{m_{bb}}$ = Persentase massa bahan bakar (%)
- \dot{m}_{tbs} = Laju aliran massa tandan buah segar (kg/detik)

Pada proses isobarik boiler terjadi dari pelepasan energi pada bahan bakar yang dimasukkan pada ruang bakar boiler. Sehingga boiler mengubah energi pada bahan bakar menjadi energi tekanan uap untuk memutar turbin dan keperluan PKS lainnya. Dengan jumlah bahan bakar dan nilai kalor pada bahan bakar akan mengetahui energi yang tersedia pada PKS dan energi yang di masukan pada boiler menggunakan persamaan 2.3 berikut.

$$Q_1 = \dot{m}_1 \times HV \dots \dots \dots \text{(Pers.2.3)}$$

dimana :

Q_1 = Energi bahan bakar yang diproduksi (kW)

\dot{m}_1 = Laju massa bahan bakar yang diproduksi (kg/detik)

HV = Nilai kalor (kJ/kg)

2.4 Efisiensi Boiler

Pada bagian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi pada boiler. Parameter yang akan di ukur pada boiler untuk menentukan efisiensi boiler yaitu energi yang masuk dan energi uap yang dihasilkan.

Uap (steam) merupakan hasil dari perubahan fase air/cair menjadi uap pada proses isobarik. Pada proses pendidihan disebut juga saturasi cair jenuh yang kemudian menjadi saturasi uap jenuh. Untuk melakukan proses pendidihan diperlukan energi panas yang diperoleh dari sumber panas , misalnya dari pembakaran bahan bakar (padat, cair, dan gas) tenaga listrik dan gas panas sebagai sisa proses kimia serta tenaga nuklir. Penguapan bisa saja terjadi disembarang tempat dan waktu pada tekanan normal , bila diatas permukaan zat cair tekanan turun dibawah tekanan mutlak [13].

Uap saturasi adalah kondisi uap air berada pada tekanan dan temperatur yang sama dengan air fase cair. Uap saturasi menjadi fase transisi antara air fase cair dengan air fase gas murni, atau disebut dengan uap panas lanjut. Pada saat air berada dalam fase transisi ini, terjadi pencampuran antara air fase cair atau disebut saturasi cair jenuh dengan air fase gas disebut juga saturasi uap jenuh dalam proporsi yang sesuai dengan jumlah panas laten yang diserap fluida.

Uap saturasi ini mulai terbentuk tepat pada saat air mencapai titik didihnya saturasi cair jenuh, hingga semua energi dari panas laten diserap oleh air. Di saat seluruh panas laten telah diserap oleh air, dan jumlah fase uap sudah mencapai

hampir 100% dibandingkan dengan fase cairnya, maka itulah batas akhir dari fase uap jenuh saturasi. Pada proses mencapai hampir 100% fase uap tersebut terjadi pada satu besaran tekanan dan temperatur konstan. Selanjutnya ketika energi panas terus di alirkaan pada uap jenuh saturasi, maka akan terjadi kenaikan temperatur fluida dan mendorong uap untuk berubah fase menjadi uap panas lanjut sehingga menghasilkan volume uap dan tekanan yang meningkat.

Terdapat beberapa proses yang terjadi saat energi panas masuk pada boiler yang mengakibatkan perubahan entalpi menjadikan perubahan fasa cair menjadi uap. Adapun proses yang terjadi pada boiler pabrik kelapa sawit ialah:

- a. Proses 1-2 : Air di panaskan pada daerator sampai titik cair jenuh
- b. Proses 2-3 : Proses isobarik pada boiler
- c. Proses 3-4 : Uap panas lanjut di alirkan ke turbin

Berdasarkan perbedaan entalpi, entropi dan volume spesifik di setiap masing-masing titik, untuk menentukan air umpan, cair saturasi, uap jenuh, dan uap lanjut. Adapun pengukuran menggunakan persamaan 2.4,2.5, dan 2.6 berikut.

$$h = h_1 + (h_2 - h_1) \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)} \dots\dots\dots(Pers.2.4)$$

dimana :

- h = Nilai interpolasi entalpi (kJ/kg)
- T = Suhu (°C)

$$s = s_1 + (s_2 - s_1) \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)} \dots\dots\dots(Pers.2.5)$$

dimana :

- s = Entropi (kJ/kg)
- T = Suhu (°C)

$$v = v_1 + (v_2 - v_1) \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)} \dots\dots\dots(Pers.2.6)$$

dimana :

- v = Volume spesifik (kJ/kg)
- T = Suhu (°C)

Pada pompa sebagai laju aliran massa fluida pada boiler dengan tekanan yang sama. Kerja tersebut disebut juga proses isentropik pada pompa. Untuk mencari entalpi pada pompa isentropik pada titik tersebut dapat menggunakan persamaan 2.7 berikut.

$$h_2 = h_1 + v_1(p_2 - p_1) \dots \dots \dots \text{(Pers.2.7)}$$

dimana :

h_2 = Entalpi pompa (kJ/kg)

h_1 = Entalpi air (kJ/kg)

v_1 = Entalpi spesifik (kJ/kg)

p_2 = Tekanan akhir (kPa)

p_1 = Tekanan awal (kPa)

Melengkapi entalpi pada setiap titik pada proses perubahan zat cair (air) menjadi cair jenuh saturasi pada daerator sebagai air umpan. Kemudian cair jenuh saturasi ke uap jenuh saturasi pada boiler dengan tekanan dan suhu yang konstan. Apabila terjadi kenaikan suhu dan tekanan pada boiler maka uap jenuh saturasi menjadi uap lanjut (superheated steam).

Entalpi pada zat akan terus bertambah seiring meningkatnya energi yang masuk pada pembakaran di ruang bakar boiler. Pada boiler PKS sendiri menggunakan uap lanjut (superheated steam) yang nantinya akan digunakan untuk memutar sudu turbin. Uap yang telah melewati turbin akan langsung di simpan pada tangki penampung uap atau disebut back pressure receiver yang kemudian digunakan untuk keperluan komponen lainnya yang memerlukan uap untuk menjalankannya.

Seluruh bahan bakar yang tersedia tidak seluruhnya masuk ke boiler. Dengan data laju aliran massa bahan bakar yang diketahui. Adapun persamaan 2.8 yang digunakan untuk menghitung laju bahan bakar yang digunakan boiler.

$$Q_2 = \dot{m}_{\text{fuel}} \times HV \dots \dots \dots \text{(Pers.2.8)}$$

dimana :

Q_2 = Jumlah energi bahan bakar masuk boiler (kW)

\dot{m}_{fuel} = Laju massa bahan bakar masuk boiler (kg/detik)

HV = Nilai kalor (kJ/kg)

Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler. Metodologi dikenal juga sebagai metode input-output' karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/output (steam) dan panas masuk/input (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi.

Energi bahan bakar yang masuk tidak seluruhnya dapat diserap oleh boiler. Semakin kecil energi yang bisa diserap boiler dari energi bahan bakar yang masuk maka efisiensi boiler semakin tinggi. Adapun untuk mengukur efisiensi boiler menggunakan persamaan 2.9 berikut.

$$\eta = \frac{Q_{in}}{Q_{bb}} \times 100 \% \dots\dots\dots(Pers.2.9)$$

dimana :

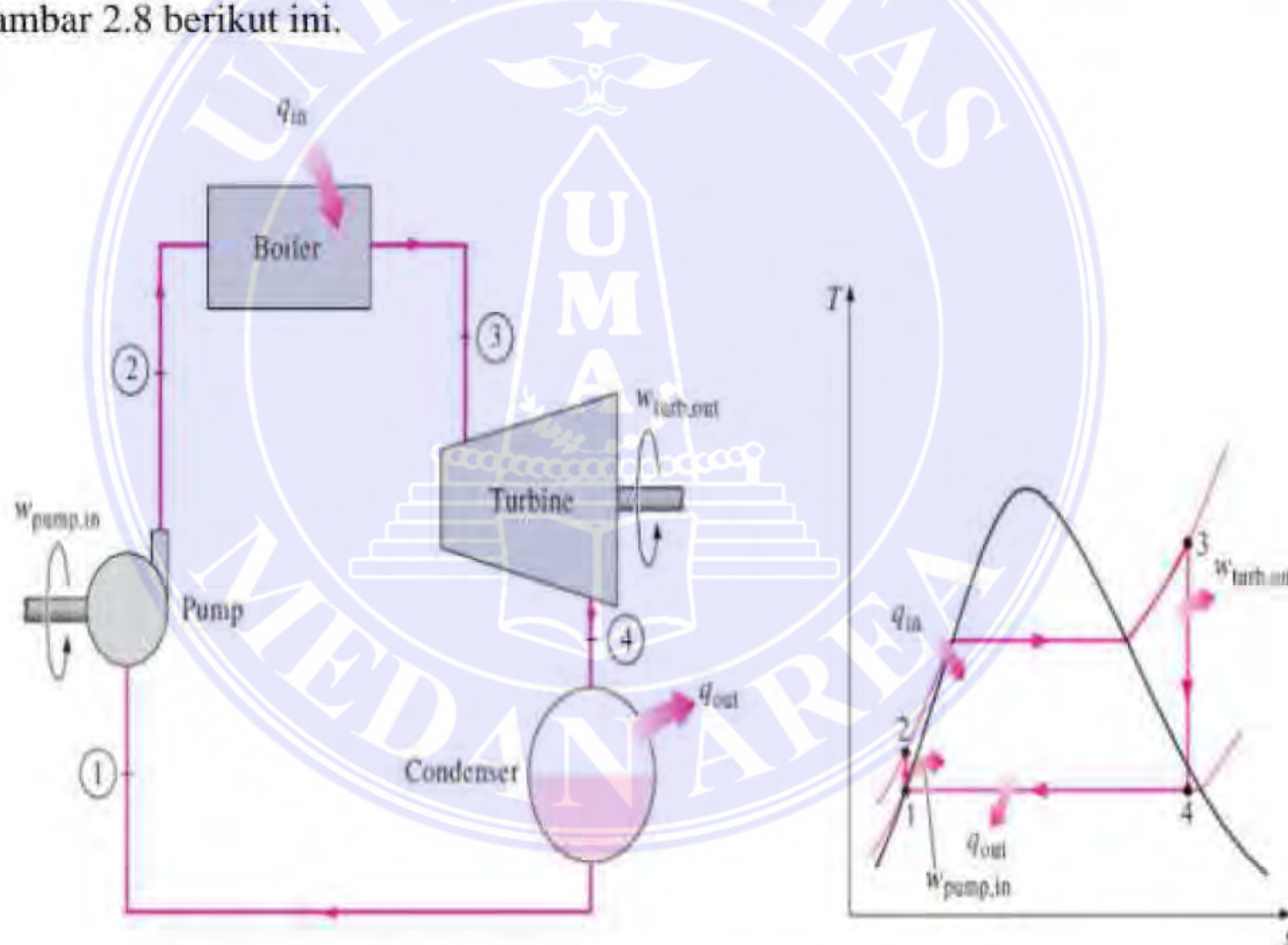
- η = Efisiensi boiler (%)
- Q_{in} = Energi yang diserap boiler (kW)
- Q_{bb} = Energi bahan bakar yang masuk ke boiler (kW)

2.5 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah sebuah siklus yang mengkonversi energi panas menjadi kerja / energi gerak. Sistem kerja pada siklus rankine panas disuplay secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Fluida yang digunakan akan mengalir secara konstan. Aliran fluida terjadi karena adanya masukan panas eksternal dan akan terjadi perubahan tekanan dalam aliran. Dalam hal ini efisiensi dari siklus rankine bergantung pada fluida bertekanan tersebut. Besarnya efisiensi siklus rankine ideal berkisar sekitar 42%. Aplikasi dari siklus rankine dapat dimanfaatkan sebagai kebutuhan seperti pembangkit listrik, proses energy thermal dan kombinasi dari keduanya. Siklus rankine merupakan modifikasi dari siklus carnot, di mana proses pemanasan dan pendinginan pada siklus ini terjadi pada tekanan yang tetap. Perbedaannya adalah pada siklus rankine menggunakan ibertekanan, sedangkan mesin carnot menggunakan gas [14].

Siklus rankine terdiri dari dari 4 komponen dasar yaitu boiler, turbin, kondensor dan pump (pompa). Setiap komponen ini mempunyai fungsi yang sangat penting dalam melakukan kerja dalam siklus rankine [15]. Boiler berfungsi sebagai tempat penampungan air yang juga akan dikonversikan menjadi uap kerja. Kemudian turbin berfungsi sebagai alat yang mengkonversi uap kerja menjadi energi gerak. Lalu kondensor berfungsi sebagai tempat mengkonversikan uap yang telah digunakan menggerakkan turbin menjadi air kembali. Dan yang terakhir adalah pompa yang berfungsi memindahkan air dari kondensor ke dalam boiler untuk dipanaskan ulang oleh boiler menjadi uap. Pada siklus rankine sederhana air dipompa oleh pompa pengisi boiler ke dalam boiler. Pompa yang bertugas untuk

memompakan air ke dalam boiler disebut feed water pump. Pompa ini harus dapat menekan air ke boiler dengan tekanan yang cukup tinggi (seuai dengan tekanan kerja siklus). Secara ideal pompa bekerja menurut proses isentropis (adiabatis reversibel) dan secara aktual pompa bekerja menurut proses adiabatis irreversibel. di dalam boiler, air yang bertekanan tinggi dipanaskan hingga menjadi uap panas lanjut. Uap panas lanjut dari boiler kemudian dialirkan ke turbin melalui pipa-pipa uap. Di dalam turbin uap, uap panas lanjut diekspansikan dan digunakan untuk memutar rotor turbin uap. Uap tekanan rendah dari turbin uap mengalir ke kondensor. Di dalam kondensor, uap didinginkan dengan media pendingin air hingga berubah fase menjadi air. Kemudian air ditampung di dalam tangki dan dipisahkan dari gas-gas yang tersisa dan siap untuk dipompa ke dalam boiler oleh pompa pengisi boiler. Rangkaian siklus rankine dan diagram T-s dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8 Rangkaian Siklus Rankine dan Diagram T-s

Dari gambar 2.8. diatas terjadi beberapa proses perubahan kondisi. Perubahan kondisi tersebut berupa :

1. Proses 1-2 adalah proses penekanan secara isentropis oleh pompa. Pada proses ini kerja masuk kedalam sistem (W_{pompa}). Dapat dihitung dengan persamaan 2.10 berikut.

$$W_{pompa} = h_2 - h_1 \times \dot{m} \dots \dots \dots (Pers.2.10)$$

dimana :

- W_{pompa} = Kerja pompa (kW)
- h_2 = Entalpi air yang di pompa (kJ/kg)
- h_1 = Entalpi air umpan (kJ/kg)
- \dot{m} = Laju massa aliran air (kg/s)

2. Proses 2-3 adalah proses pada tekanan konstan yang berlangsung pada boiler. Pada proses ini kalor masuk kedalam sistem (Q_{in}). Dapat dihitung dengan persamaan 2.11 berikut untuk mengukur energi yang diserap boiler.

$$Q_{in} = \dot{m}_{steam} \times h_3 \dots \dots \dots (Pers.2.11)$$

dimana :

- Q_{in} = Laju aliran panas masuk (kW)
- \dot{m}_{steam} = Laju aliran massa uap boiler (kg/s)
- h_3 = Entalpi uap lanjut (kJ/kg)

3. Proses 3-4 adalah proses ekspansi isentropis (adiabatis reversibel) yang berlangsung di dalam turbin uap. Pada proses ini terjadi kerja keluar sistem (W_{out}). Untuk kerja turbin dapat dihitung dengan persamaan 2.12 berikut.

$$W_{turbin} = \dot{m}_{steam} \times (h_3 - h_2) \dots \dots \dots (Pers.2.12)$$

dimana :

- W_{turbin} = Kerja turbin (kW)
- \dot{m}_{steam} = Laju aliran massa uap boiler (kg/s)
- h_3 = Entalpi uap lanjut (kJ/kg)
- h_2 = Entalpi air pada pompa (kJ/kg)

4. Proses 4-1 adalah proses pada tekanan konstan yang berlangsung di dalam kondensor. Proses ini kalor keluar dari sistem (pembuang kalor) (Q_{out}). Dapat dihitung dengan persamaan 2.13 berikut.

$$Q_{out} = h_4 - h_1 \dots \dots \dots (Pers.2.13)$$

dimana :

- Q_{out} = Energi panas (kalor) dalam kondensor (kW)
- h_4 = Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)
- h_1 = Entalpi air umpan (kJ/kg)

Dalam simbol efisiensi panas maka Efisiensi termal siklus Rankine dapat di hitung dengan persamaan 2.14 berikut.

$$\eta_{th} = \frac{W_t - W_p}{Q_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots(Pers.2.14)$$

dimana :

- η_{th} = Efisiensi thermal (%)
- W_t = Kerja turbin (kW)
- W_p = Kerja Pompa (kW)
- Q_{in} = Laju aliran panas masuk (kW)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan sejak tanggal pengesahan usulan oleh pengelola program studi sampai dinyatakan selesai yang direncanakan berlangsung selama 3 bulan. Tempat penulis melakukan penelitian ini dilaksanakan di PKS PT. Amal Tani Tanjung Putri Kabupaten Langkat, Sumatera Utara.

Waktu pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1. Waktu Pelaksanaan Penelitian

Aktifitas	Juni				Juli				Ags.				Sep.				Okt.				Nov.				Des.				Jan.				Mei.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pengajuan Judul	■																																			
Penyelesaian Proposal					■																															
Seminar Proposal									■																											
Pengumpulan Data													■																							
Analisis data																	■																			
Penyelesaian Laporan																					■															
Seminar Hasil Sidang Sarjana																									■											

3.2 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam menyelesaikan penelitian ini adalah, sebagai berikut :

1. Infrared Digital Thermometer

Alat ini digunakan untuk mengukur panas uap pada boiler dengan cara menargetkan alat tersebut pada pipa uap. Alat tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 *Infrared Digital Thermometer*

2. Boiler PKS

Adapun boiler yang akan di analisa di PKS PT. Amal Tani adalah Boiler Mech tipe pipa air dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Boiler PKS PT. Amal Tani

3.3. Langkah Pengujian

Dalam penelitian ini akan di lakukan pengambilan data secara langsung pada boiler dengan alat ukur. Pada pengumpulan data pengujian dilakukan saat boiler dalam keadan beroperasi. Dengan dilakukanya pendataan pada titik tertentu ketika boiler mengalami perubahan dalam berbagai hal. Hal tersebut sebagai acuan

dalam penumpulan data yang nantinya akan menentukan kinerja boiler yang di analisa.

1. Pengukuran laju aliran air umpan

Pengambilan data di lakukan pada Daerator saat sedang beroperasi. Daerator yang memiliki fungsi sebagai pemasok air umpan pada boiler.

2. Pengukuran panas air umpan

Pengukuran panas pada air umpan di lakukan pada daerator sebelum masuk ke boiler. Pencarian data ini dilakukan untuk menentukan entalpi spesifik pada air umpan. Sehingga dapat ditentukannya air umpan tersebut masih sub cold atau sudah menjadi saturated water. Pengukuran air umpan menggunakan alat *infrared digital thermometer*.

3. Pengukuran tekanan uap pada boiler

Pengukuran tekanan uap yang dihasilkan boiler di perlukan dengan panas uap tersebut untuk menentukan entalpi spesifik dan beberapa karakteristik spesifik dari uap tersebut dari uap tersebut.

4. Pengukuran panas uap lanjut

Uap yang dihasilkan akan memiliki suhu yang cukup tinggi sehingga nantinya akan menjadi parameter pengukuran. Untuk mengukur suhu panas uap lanjut yang dihasilkan boiler menggunakan alat *infrared digital thermometer*. Dalam pengukuran uap akan dilakukan secara bertahap sesuai data yang dibutuhkan.

5. Pengukuran massa bahan bakar

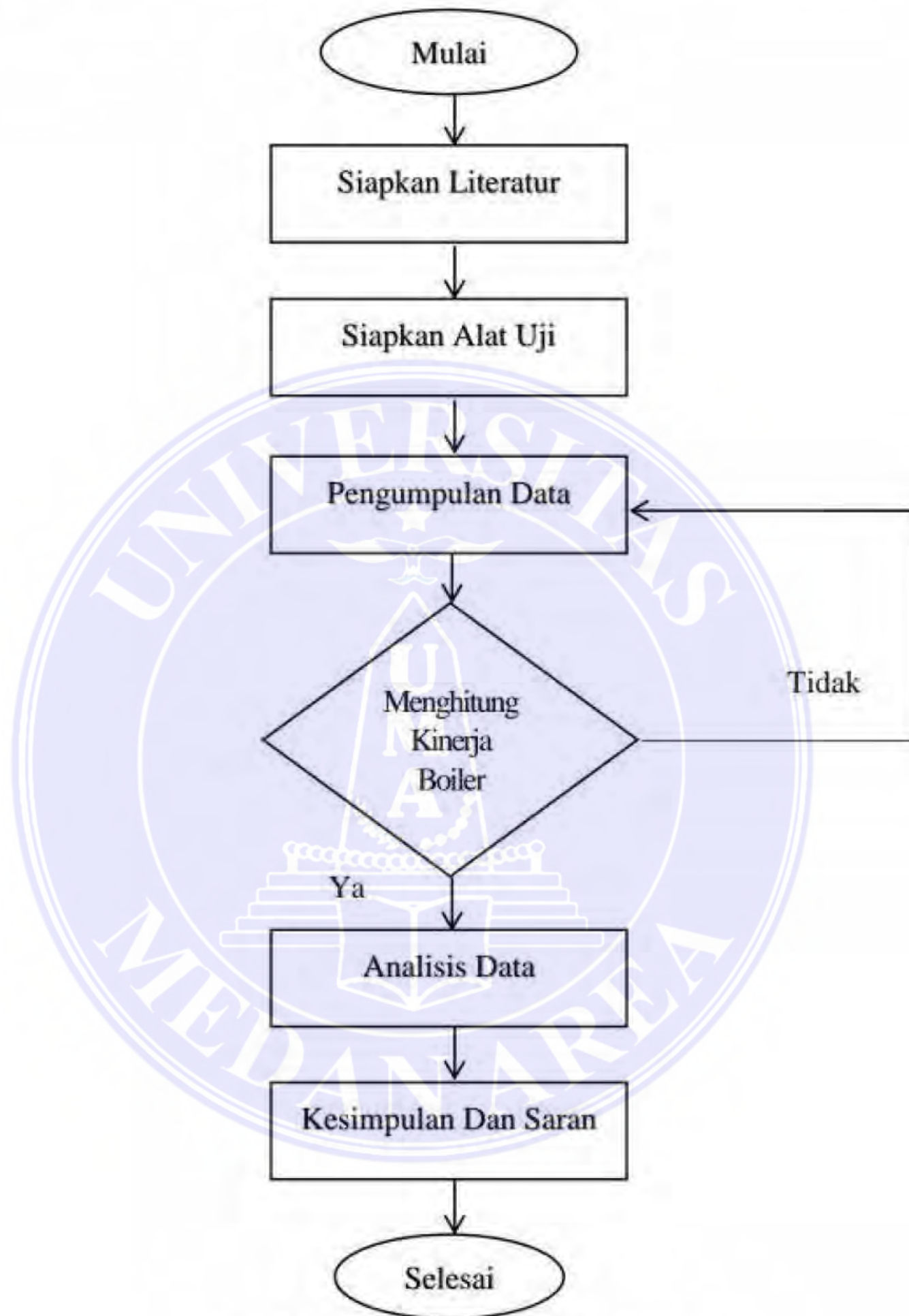
Pengukuran massa bahan bakar yang digunakan pada boiler di lakukan pada tungku pembakaran boiler. Ruang pembakaran juga sebagai parameter nilai kalor yang dilepaskan oleh massa bahan bakar dan energi yang masuk untuk memanaskan air boiler.

6. Pengujian kadar zat pada bahan bakar cangkang dan fiber

Pengambilan data kadar zat pada cangkang dan fiber berdasarkan sampel dari hasil pengolahan. Dengan menguji sampel yang telah di ambil untuk kemudian di uji menggunakan alat analisa kadar.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dibawah ini merupakan langkah dalam menyelesaikan tugas akhir ini.



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan perhitungan dari data yang di dapat maka disimpulkan sebagai berikut.

1. Pada suhu air umpan 60°C , kerja pompa sebesar 11,67 kW, energi yang diserap boiler sebesar 16.301 kW, kerja turbin sebesar 14.894 kW, Pada suhu air umpan 90°C untuk kerja pompa sebesar 11,84 kW, energi yang diserap boiler 16.301 kW, kerja turbin sebesar 14,195 kW.
2. Dari perhitungan yang didapat nilai kalor pada fiber sebesar 10.201 kJ/kg, sedangkan cangkang sebesar 15.885 kJ/kg, dengan energi yang dihasilkan oleh fiber 11.051 kW, sedangkan energi yang dihasilkan cangkang 9.266 kW, maka jumlah total energi bahan bakar yang masuk boiler sebesar 20.317 kW.
3. Pada suhu air umpan 60°C dan 90°C memiliki pengaruh perbedaan efisiensi pada boiler. Pengaruh nya pada efisiensi boiler yaitu 73,31% dan 69,87%. Tinggi nya efisiensi pada suhu 60°C dikarenakan dengan laju aliran massa bahan bakar yang sama dengan 90°C namun boiler dapat menghasilkan laju aliran uap yang sama yaitu 5,56 kg/detik.

5.2. Saran

1. Perlu adanya pemeliharaan pada siklus tenaga uap di pabrik PT Amal Tani agar memaksimalkan kinerja pada pabrik kelapa sawit.
2. Untuk Pengkajian lebih mendalam pada laju aliran energi dan massa uap pada siklus tenaga uap di pabrik pengolahan kelapa sawit PT. Amal Tani agar memaksimalkan peningkatan dalam pemanfaatan energi.
3. Perlu perawatan yang lebih baik lagi terhadap boiler di pabrik pengolahan kelapa sawit PT. Amal Tani agar mencegah penurunan kinerja terhadap boiler.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengukuran Suhu Air Umpan

a). Pada temperatur air umpan 60°C

$$\begin{aligned}
 h_1 &= h_1 + (h_2 - h_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 251,18 \text{ kJ/kg} + (419,17 \text{ kJ/kg} - 251,18 \text{ kJ/kg}) \frac{(60^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})}{(100^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})} \\
 &= 251,18 \text{ kJ/kg} \\
 v_1 &= v_1 + (v_2 - v_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 0,001023 \text{ m}^3/\text{kg} + (0,00104 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001023 \text{ m}^3/\text{kg}) \frac{(60^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})}{(100^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})} \\
 &= 0,001023 \text{ m}^3/\text{kg} \\
 h_2 &= h_1 + v_1(p_2 - p_1) \\
 &= 251,18 \text{ kJ/kg} + 0,001023 \text{ kg/m}^3(2.157 \text{ kPa} - 101,42 \text{ kPa}) \\
 &= 253,28 \text{ kJ/kg} \\
 h_3 &= h_1 + (h_2 - h_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 2911,7 \text{ kJ/kg} + (3024,2 \text{ kJ/kg} - 2911,7 \text{ kJ/kg}) \frac{(260^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})}{(300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})} \\
 &= 2934,20 \text{ kJ/kg} \\
 v_3 &= v_1 + (v_2 - v_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 0,12502 \text{ m}^3/\text{kg} + (0,12551 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,12502 \text{ m}^3/\text{kg}) \frac{(260^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})}{(300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})} \\
 &= 0,12512 \text{ m}^3/\text{kg}
 \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya setiap titik yang telah dicari maka perhitungan unjuk kerja pada boiler dengan temperature 60°C sebagai berikut.

1. Kerja pompa

$$\begin{aligned}
 W_p &= (h_2 - h_1) \dot{m} \\
 &= (253,28 \text{ kJ/kg} - 251,18) \times 5,56 \text{ kg/detik} \\
 &= 11,67 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

2. Energi boiler

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= \dot{m}_{\text{steam}} \times h_3 \\
 &= 5,56 \text{ kg/detik} \times 2934,20 \text{ kJ/kg} \\
 &= 16.301 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3. Kerja turbin

$$\begin{aligned}
 W_t &= \dot{m}_{\text{steam}} \times (h_3 - h_2) \\
 &= 5,56 \text{ kg/detik} \times (2934,20 \text{ kJ/kg} - 253,28 \text{ kJ/kg}) \\
 &= 14.894 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

b.) Pada temperatur air umpan 90°C

$$\begin{aligned}
 h_1 &= h_1 + (h_2 - h_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 377,04 \text{ kJ/kg} + (419,17 \text{ kJ/kg} - 377,04 \text{ kJ/kg}) \frac{(90^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})}{(100^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})} \\
 &= 377,04 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_1 &= v_1 + (v_2 - v_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg} + (0,001043 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg}) \frac{(90^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})}{(100^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})} \\
 &= 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_2 &= h_1 + v_1(p_2 - p_1) \\
 &= 377,04 \text{ kJ/kg} + 0,001036 \text{ kg/m}^3(2.157 \text{ kPa} - 101,42 \text{ kPa}) \\
 &= 379,17 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_3 &= h_1 + (h_2 - h_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 2911,7 \text{ kJ/kg} + (3024,2 \text{ kJ/kg} - 2911,7 \text{ kJ/kg}) \frac{(260^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})}{(300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})} \\
 &= 2934,20 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_3 &= v_1 + (v_2 - v_1) \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \\
 &= 0,12502 \text{ m}^3/\text{kg} + (0,12551 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,12502 \text{ m}^3/\text{kg}) \frac{(260^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})}{(300^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C})} \\
 &= 0,12512 \text{ m}^3/\text{kg}
 \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya setiap titik yang telah dicari maka perhitungan unjuk kerja pada boiler dengan temperature 90°C sebagai berikut.

1. Kerja pompa

$$\begin{aligned}
 W_p &= (h_2 - h_1) \dot{m} \\
 &= (379,17 \text{ kJ/kg} - 377,04) \times 5,56 \text{ kg/detik} \\
 &= 11,84 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

2. Energi boiler

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= \dot{m}_{\text{steam}} \times (h_3 - h_2) \\
 &= 5,56 \text{ kg/detik} \times 2934,20 \text{ kJ/kg} \\
 &= 16.301 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3. Kerja turbin

$$\begin{aligned}
 w_t &= \dot{m}_{\text{steam}} \times (h_3 - h_2) \\
 &= 5,56 \text{ kg/detik} \times (2934,20 \text{ kJ/kg} - 379,17 \text{ kJ/kg}) \\
 &= 14.195 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Lampiran 2. Pengukuran Nilai Kalor Bahan Bakar

1. Laju massa bahan bakar fiber dan cangkang.

$$\dot{m}_{bb} = P_{m_{bb}} \% \times \dot{m}_{tbs} =$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fiber} &= \text{Fiber \%} \times \text{TBS (kg)} = 13 \% \times 8,33 \text{ kg/detik} \\
 &= 1,08 \text{ kg/detik}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Cangkang} &= \text{Cangkang \%} \times \text{TBS (kg)} = 7\% \times 8,33 \text{ kg/detik} \\
 &= 0,58 \text{ kg/detik}
 \end{aligned}$$

2. Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor fiber.

$$\begin{aligned}
 Q &= m \times c \times \Delta t \\
 &= 1,0833 \text{ kg/detik} \times 47,082 \text{ kJ/kg} \times (260^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) \\
 &= 10.201 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Energi yang dihasilkan fiber.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{fiber}} &= \dot{m}_{\text{fuel}} \times HV = 1,083 \text{ kg/detik} \times 10.201 \text{ kJ/kg} \\
 &= 11.051 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Nilai kalor cangkang

$$\begin{aligned}
 Q &= m \times c \times \Delta t \\
 &= 0,5833 \text{ kg/detik} \times 136,164 \text{ kJ/kg} \times (260^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) \\
 &= 15.885 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Energi yang dihasilkan cangkang.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{Cangkang}} &= \dot{m}_{\text{fuel}} \times HV = 0,583 \text{ kg/detik} \times 15.885 \text{ kJ/kg} \\
 &= 9.266 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Dengan diketahui energi yang masuk boiler yaitu fiber sebesar 11.051 kW dan cangkang sebesar 9.266 kW. Maka jumlah total energi bahan bakar yang masuk ke boiler 20.317 kW.

Lampiran 3. Efisiensi Boiler Dari Suhu Air Umpan Dan Nilai Kalor

1. Energi dengan suhu air umpan 60°C dan nilai kalor bahan bakar.

Efisiensi Boiler.

$$\eta = \frac{Q_{in}}{Q_{bb}} = \frac{14.894 \text{ kW}}{20.317} \times 100$$

$$= 73,31 \%$$

Berdasarkan hasil pengukuran yang di dapat efisiensi boiler sebesar 73,31 % berdasarkan energi yang mampu di serap boiler yaitu 14.894 kW dari seluruh jumlah energi bahan bakar yang masuk yaitu 20.317 kW.

2. Energi dengan suhu air umpan 90°C dan nilai kalor bahan bakar.

Efisiensi Boiler

$$\eta = \frac{Q_{in}}{Q_{bb}} = \frac{14.195 \text{ kW}}{20.317} \times 100$$

$$= 69,87 \%$$

Berdasarkan hasil pengukuran yang di dapat efisiensi boiler sebesar 69,87 % berdasarkan energi yang mampu di serap boiler yaitu 14.195 kW dari seluruh jumlah energi bahan bakar yang masuk yaitu 20.317 kW.

DAFTAR PUSTAKA

- Siti, S. (2021). Uji kualitas air boiler pada proses pengolahan tandan buah segar di pabrik kelapa sawit (Doctoral dissertation, Matematika dan ilmu pengetahuan alam).
- Siswanto, J. E. (2020). Analisis Limbah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Boiler dengan Menggunakan Variasi Campuran Antara Fiber dan Cangkang Buah Sawit. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 3(1), 22-27.
- Harris, H., Anam, S., & Mahmudsyah, S. (2013). Studi pemanfaatan limbah padat dari perkebunan kelapa sawit pada PLTU 6 MW di Bangka Belitung. *Jurnal Teknik ITS*, 2(1), B73-B78.
- Kunarto, K. (2018). Analisa Efisien Boiler Pabrik Kelapa Sawit Dengan Menggunakan Bahan Bakar Fibre Dan Cangkang Penelitian Mandiri Universitas Bandar Lampung.
- Simatupang, D. F., & Ramadhani, R. (2021). Penentuan Kebutuhan Injeksi Ammonia untuk Meningkatkan pH pada Air Umpan Boiler: Studi Kasus di PT. XYZ Sumatera Utara. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 1(5), 187-191.
- Wilastari, S., & Hidayat, T. N. (2021). Pencegahan Kerak Dan Korosi Umpan Ketel Uap Di PG Mojo Sragen. *Jurnal Sains Teknologi Transportasi Maritim*, 3(1), 41-47.
- Hilga, J. N., Surindra, M. D., & Haryanto, R. (2016). Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Sistem Uap Ekstraksi Pada Deaerator PLTU Tanjung Jati B Unit 2. *Eksergi*, 10(3).
- Syahputra, Y. A. (2018). Analisa Water tube boiler menggunakan thermocouple tipe k pt 100 sebagai sensor temperature dan defferential pressure dalam proses efesiensi bahan bakar.
- Syaiful, R. (2019). Perawatan Dan Perbaikan Burner Pembakar Ketel Untuk Memaksimalkan Produksi Uap Di Km. Binaiya PT. Pelni. Karya Tulis.
- Pakpahan, B., Silalahi, C., Gultom, D., Sihombing, E., Simanjuntak, J., Munthe, L & Lubis, R. (2021). B. Pakpahan Ms: Analisis Pengaruh Perbandingan Bahan Bakar Ketel Uap Berbahan Bakar Cangkang Dan Serabut Dengan Kapasitas 20 Ton Uap/Jam. *Sinergi Polmed : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2(2), 1-10.
- KANDAR, M. (2021). Karakteristik Peltier pada Elemen Termoelektrik TEC1-12706 sebagai Efek Seebeck untuk Konversi Energi Alternatif Penghasil Listrik. In *Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi (SNETO)* (pp. 373-383).
- Hikmawan, O Naufa, M., & Simarmata, L. H. Pemanfaatan Cangkang Dan Serat Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Boiler Utilization Of Palm Kernel Shell And Fiber As Boiler Fuel.
- Susanto, J. P., Santoso, A. D., & Suwedi, N. (2017). Perhitungan Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Sumber Energi Terbaharukan dengan Metode LCA. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2), 165. <https://doi.org/10.29122/jtl.v18i2.2046>

- Putra, A. D. (2016). Studi Potensi Limbah Biomassa Kelapa Sawit Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT. Pkerbunan Nusantara XIII PKS Parindu. Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura, 2(1). [15]
- D. Rany Puspita, H. Sri dan A. Wandi "Mesin Pengaduk Adonan untuk Meningkatkan Produktivitas UKM. Keripik Sayur Jaya Makmur di Kota Malang" Vol. 25, No. 1, januari 2022
- Zulmi, M. R. (2020). Analisis Efisiensi Energi, Efisiensi Eksergi dan Laju Kerusakan Eksergi Pada Komponen Mesin PLTU Muara Jawa Dengan Variasi Pembebanan (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Kalimantan).

