

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Boiler

Boiler merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menghasilkan steam (uap) dalam berbagai keperluan. Air di dalam boiler 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 dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam boiler. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (MF Syahputra.2010).

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. 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 sistem (MF Syahputra.2010).

2.1.1 Fungsi Boiler

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 (Asmudi, 2008).

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, misalnya pada pusat-pusat listrik tenaga uap.

2.2 Komponen- Komponen Boiler

1. *Furnace* (Ruang bakar)

Furnace (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap. Dinding ruang bakar umumnya dilapisi dengan pipa-pipa. Semakin cepat laju peredaran air, pendinginan dinding pipa bertambah baik dan kapasitas *steam* yang dihasilkan bertambah besar.

2. *Burner*

Pada prinsipnya *burner* adalah transduser yang berguna untuk mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi yang lain. Dalam kasus ini burner berfungsi untuk mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar, menjadi energi panas di dalam *furnace* melalui suatu reaksi kimia dalam nyala api. Kunci utama *burner* adalah untuk membakar bahan bakar seefisien mungkin dan menghasilkan *heat flux* yang optimum. Pada premix *burner* konvensional, bahan bakar dicampurkan dengan udara primer yang mengalir ke dalam *burner*. Aliran udara primer harus dimaksimalkan tanpa menaikkan tinggi nyala api dalam *burner*.

3. *Steam Drum*

Steam drum merupakan tempat penampungan air panas dan pembangkitan *steam*. *Steam* masih bersifat jenuh (*saturated*).

4. *Water Drum*

Water Drum berfungsi sebagai tempat penampungan air umpan yang dialirkan menggunakan pompa sebelum masuk ke *steam drum* melalui *water tube*.

5. *Superheater*

Superheater merupakan tempat pengeringan *steam* dan siap dikirim melalui main *steam pipe* dan siap untuk menggerakkan turbin *steam* atau menjalankan proses industri.

6. Kondensor

Kondensor berfungsi untuk mengkondensasikan *steam* dari turbin (*steam* yang telah digunakan untuk memutar turbin).

7. Safety valve

Safety Valve merupakan saluran buang *steam* jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan *boiler* menahan tekanan *steam*.

2.3 Jenis-Jenis Boiler

2.3.1 Boiler Pipa Api (Fire Tube Boiler)

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 (Raharjo dan Karnowo 2008: 180). Dalam perancangan boiler ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar boiler yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan.

Faktor yang mendasari pemilihan jenis boiler adalah sebagai berikut :

- a. Kapasitas yang digunakan
- b. Kondisi steam yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan
- d. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Kerugian ketel pipa api :

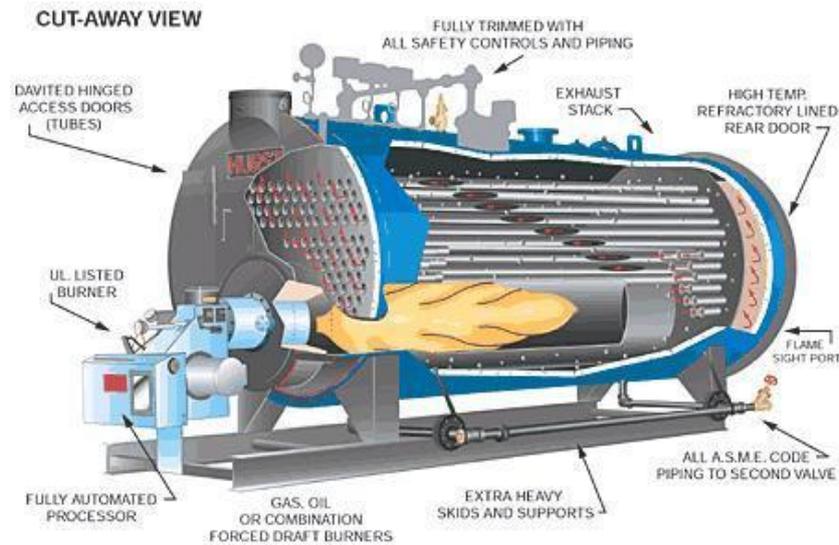
1. Tekanan steam hasil rendah
2. Kapasitas kecil
3. Pemanasan relatif lama

Prinsip aliran gas dalam ketel steam pipa api ada 3 macam :

1. Konstruksi dua laluan (pass) Konstruksi ini merupakan konstruksi ketel scotch yang mula – mula lorong api yang besar dibutuhkan untuk mendapatkan bidang – bidang pemanas yang luas.
2. Konstruksi tiga laluan (pass) Konstruksi ini gas asap melewati jalan yang lebih panjang sebelum meninggalkan cerobong, sehingga dapat menaikkan efisiensi kalor,

akan tetapi tenaga yang dibutuhkan draft fan akan membesar akibat kerugian tekanan gas asap.

3. Konstruksi empat laluan (pass) Konstruksi ini merupakan unit yang mempunyai efisiensi yang lebih tinggi, karena jalan asap menjadi lebih panjang, maka tenaga draft fan menjadi lebih besar pula. Agar gas asap lebih tinggi dibuat ukuran pipa – pipa untuk pass – pass berikut yang lebih kecil. Untuk lebih jelas boiler pipa api tipe vertikal dapat dilihat pada gambar 1.



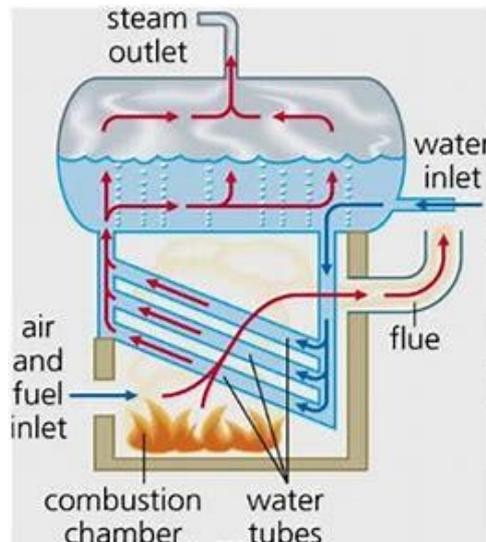
Gambar 2.1 Fire Tube Boiler

Boiler yang tergolong dalam jenis fire tube boiler adalah jenis boiler kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 Ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm², jadi tergolong ke dalam boiler bertekanan rendah. Sering disebut ketel-ketel tanki, karena tempat air yang akan dipanaskan biasanya berbentuk tanki. Karena kapasitas, tekanan, dan temperature uap yang dihasilkan rendah maka fire tube boiler jarang digunakan untuk pengolahan modern. Fire tube boiler memiliki konstruksi yang relatif sederhana, kokoh, dan mudah dijangkau harganya. Kekurangannya adalah lambat dalam mencapai tekanan operasi pada awal operasi, dan keuntungan menggunakan boiler ini adalah fleksibel terhadap perubahan beban secara cepat (Dalimunthe, 2006).

2.3.2 Boiler Pipa Air (water tube boiler)

Ketel pipa air, yaitu ketel uap dengan air atau uap berada di dalam pipa - pipa atau tabung dengan pipa api atau asap berada diluarnya. Pada water tube boiler, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam drum. Steam terbentuk

karena sirkulasi air yang dipanaskan oleh gas pembakar yang terjadi di daerah uap di dalam drum. Sebagai ketel yang sudah sangat modern, water tube boiler biasanya dirancang dengan tekanan sangat tinggi dan memiliki kapasitas steam antara 4.500-12.000 kg/jam (UNEP, 2006).



Gambar 2.2. Water Tube Boiler

Umumnya water tube boiler terdiri dari beberapa drum (biasanya 2 atau 4 buah) dengan eksternal tubes. Biasanya ujung-ujung tubes disambung atau dihubungkan langsung dengan drum-drum dengan cara di roll atau di ekspansi, kadang kala sambungan antara tubes dengan drum selain di roll juga diperkuat dengan las atau seal welded.¹³ Apabila kapasitas boiler lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi boiler lebih besar dari 24 bar. Maka boiler dianggap cocok untuk produksi uap dalam jumlah besar dengan skala industri dengan uap yang dihasilkan yaitu superheated (Dalimunthe, 2006). Penggunaan water tube boiler diakui memiliki keuntungan yang lebih karena memiliki reaksi yang cepat terhadap beban, dan kelembapan panas termal yang dapat dikatakan kecil. Unit pengolahan yang sudah modern banyak menggunakan water tube boiler sebagai pilihan, karena dapat menghasilkan uap air dengan kapasitas, temperatur, dan tekanan yang tinggi sesuai kebutuhan.

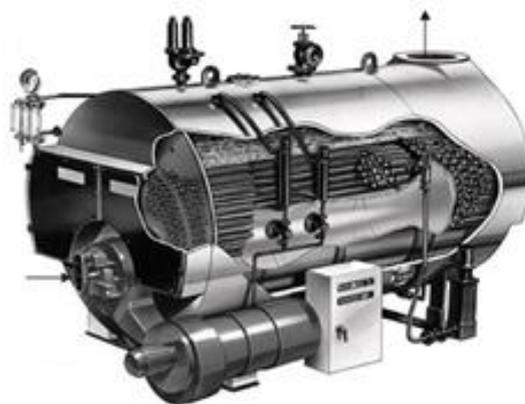
2.3.3 Packaged Boiler

Disebut 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.

Ciri-ciri dari packaged boiler adalah:

1. Kecilnya ruang pembakaran dan tingginya panas yang dilepas menghasilkan penguapan yang lebih cepat.
2. Banyaknya jumlah pipa yang berdiameter kecil membuatnya memiliki perpindahan panas konvektif yang baik.
3. Sistem forced atau induced draft menghasilkan efisiensi pembakaran yang baik.
4. Sejumlah lintasan/pass menghasilkan perpindahan panas keseluruhan yang lebih baik.
5. Tingkat efisiensi termisnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan boiler lainnya.



Gambar 2.3 Oil Fired Packaged Boiler

Boiler tersebut dikelompokkan berdasarkan jumlah pass nya yaitu berapa kali pembakaran melintasi boiler. Ruang pembakaran ditempatkan sebagai lintasan pertama setelah itu kemudian satu, dua, tiga set pipa api. Boiler yang paling umum dalam kelas ini adalah unit tiga pass/lintasan dengan dua set fire-tube/pipa api dan gas buangnya keluar dari boiler.

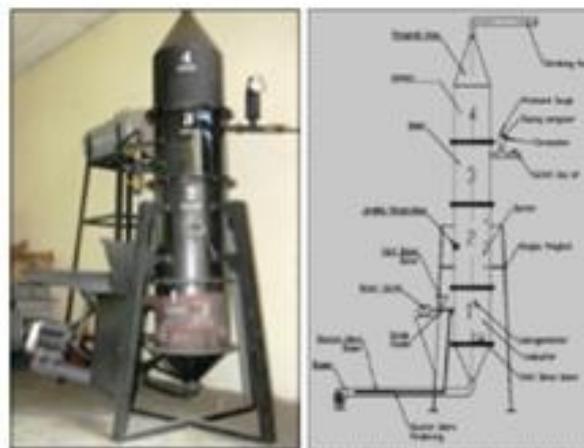
2.3.4 Fluidized Bed Combustion

Fluidized bed combustion (FBC) muncul sebagai alternatif dan memiliki keuntungan yang signifikan atas sistem pembakaran konvensional dan memberikan banyak keuntungan - desain kompak boiler, fleksibilitas bahan bakar, efisiensi

pembakaran yang lebih tinggi dan mengurangi emisi polutan berbahaya seperti SO_x dan NO_x. Bahan bakar dibakar di boiler ini termasuk batubara, sekam padi, ampas tebu & limbah pertanian lainnya. Boiler fluidized bed memiliki kapasitas yang luas sebarannya 0,5 T / jam sampai lebih dari 100 T / jam.

Ketika udara atau gas merata dilewatkan keatas melalui bed halus dibagi partikel padat seperti pasir didukung pada mesh halus, partikel tidak terganggu pada kecepatan yang rendah. Begitu kecepatan udaranya berangsur-angsur naik, terbentuklah suatu keadaan dimana partikel tersuspensi dalam aliran udara - bed tersebut disebut "fluidized". Dengan peningkatan lebih lanjut dalam kecepatan udara, ada pembentukan gelembung, turbulensi yang kuat, pencampuran cepat dan pembentukan permukaan tidur didefinisikan padat. Bed partikel padat menampilkan sifat dari cairan mendidih dan penampilan cairan - "mengelegak fluidized bed".

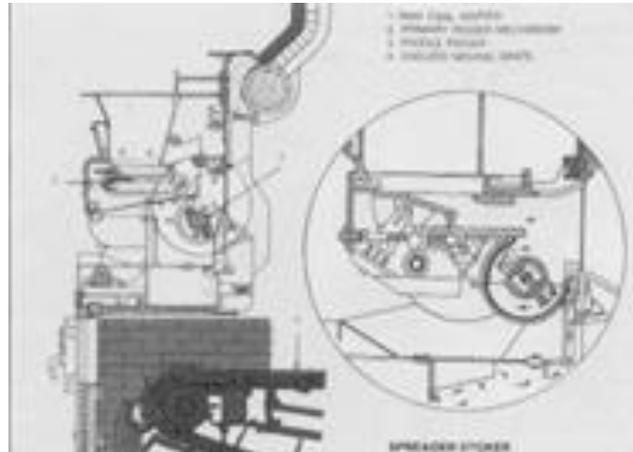
Jika partikel pasir dalam keadaan fluidized dipanaskan dengan suhu pengapian batubara, dan batu bara disuntikkan terus ke boiler fluidized bed, batubara akan membakar dengan cepat dan boiler fluidized bed mencapai suhu yang seragam. Pembakaran dengan fluidized bed (FBC) terjadi pada sekitar 840OC hingga 950. Karena suhu ini jauh di bawah suhu fusi abu, mencair abu dan masalah terkait dihindari. Semakin rendah suhu pembakaran dicapai karena koefisien tinggi perpindahan panas akibat pencampuran cepat dalam fluidized bed dan ekstraksi panas yang efektif dari boiler fluidized bed melalui di-bed tabung perpindahan panas dan dinding dari boiler fluidized bed. Kecepatan gas dipertahankan antara kecepatan fluidisasi minimum dan kecepatan masuk partikel. Hal ini memastikan operasi yang stabil dari tempat tidur dan menghindari terbawanya partikel dalam aliran gas.



Gambar 2.4 Fluidized Bed Boiler

2.3.5 Stoker Fired Boiler

Stokers diklasifikasikan menurut metode memasukan bahan bakar ke tungku dan oleh jenis grate. Klasifikasi utama adalah spreader stoker dan chain-gate atau traveling-gate stoker.



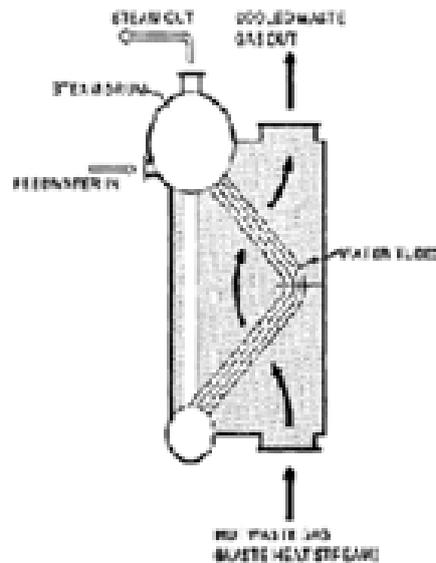
Gambar 2.5 Spreader Stoker Boiler

2.3.6 Stokers Spreader

Stokers Spreader memanfaatkan kombinasi pembakaran suspensi dan pembakaran grate. Batubara terus dimasukkan ke dalam tungku di atas tempat tidur pembakaran batubara. Denda batubara dibakar dalam suspensi; partikel yang lebih besar jatuh ke perapian, di mana mereka dibakar di tempat batubara tipis, pembakaran cepat. Metode pembakaran ini memberikan fleksibilitas yang baik terhadap fluktuasi beban, dikarenakan penyalaan hampir seketika saat laju pembakaran meningkat. Disebabkan oleh spreader stoker lebih disukai dibanding jenis stoker lainnya dalam berbagai aplikasi industri.

2.3.7 Waste Heat Boiler

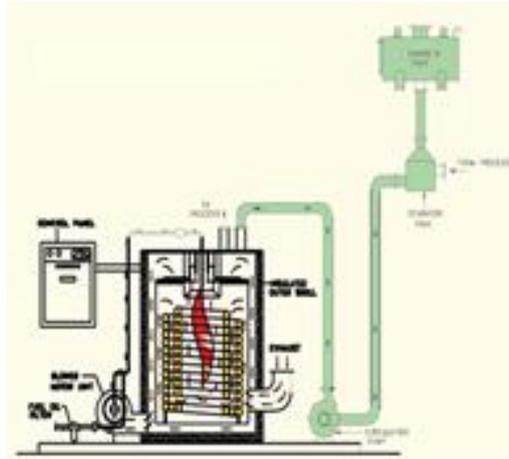
Dimanapun waste heat tersedia pada suhu menengah atau tinggi, boiler limbah panas dapat dipasang secara ekonomi. Dimanapun permintaan steam lebih dari uap yang dihasilkan selama waste heat, pembakar bahan bakar tambahan juga digunakan. Jika tidak ada penggunaan langsung dari uap, uap dapat dibiarkan ke bawah dalam uap turbine- genset dan listrik yang dihasilkan dari itu. Hal ini banyak digunakan dalam pemulihan panas dari gas buang dari turbin gas dan mesin diesel.



Gambar 2.6 A Simple Schematic of Waste Heat

2.3.8 Thermic Fluid Heater

Dalam beberapa kali pemanas fluida termis telah menemukan aplikasi luas untuk proses pemanasan tidak langsung. menggunakan minyak bumi yang berbasis cairan sebagai media perpindahan panas, pemanas ini memberikan suhu terus dipertahankan untuk peralatan pengguna. Sistem pembakaran terdiri dari sebuah fixed grate dengan susunan draft mekanis. bahan bakar modern minyak thermic fluid heater terdiri dari kumparan ganda, konstruksi tiga pass dan dipasang dengan sistem tekanan termodulasi. The fluida termis, yang bertindak sebagai pembawa panas, dipanaskan dalam pemanas dan beredar melalui peralatan pengguna. Ada mengalihkan panas untuk proses melalui penukar panas dan cairan ini kemudian dikembalikan ke pemanas. Aliran fluida termis pada akhir pengguna dikontrol oleh katup kontrol pneumatik dioperasikan, berdasarkan suhu operasi. Pemanas beroperasi pada api rendah atau tinggi tergantung pada suhu minyak yang kembali yang bervariasi dengan beban sistem.



Gambar 2.7 A Typical Configuration of Thermic Fluid Heater

Keuntungan dari pemanas ini adalah:

1. Siklus tertutup operasi dengan minimal kerugian dibandingkan dengan steam boiler.
2. Bebas-bertekanan sistem operasi bahkan untuk suhu sekitar 250 0C dibandingkan 40 kg/cm² uap persyaratan tekanan dalam sistem Uap yang sama.
3. Kontrol otomatis pengaturan, yang menawarkan fleksibilitas operasional.
4. Baik efisiensi thermal sebagai kerugian akibat pukulan turun, condensate drain dan flash steam tidak ada dalam sistem pemanas cairan thermic.
5. Ekonomi keseluruhan thermic pemanas cairan akan tergantung pada dasar aplikasi dan referensi tertentu. Batu bara dipecah fluida termis pemanas dengan berbagai 55-65 persen efisiensi termal dapat menguntungkan dibandingkan dengan kebanyakan boiler. Penggabungan perangkat pemulihan panas di lintasan gas buang meningkatkan tingkat efisiensi termal lebih lanjut.

2.4 Sistem Boiler

Sistem yang dimiliki boiler untuk memenuhi kebutuhan steam terbagi menjadi beberapa sistem yaitu sistem air umpan (feed water system), sistem steam (steam system) dan sistem bahan bakar (fuel system) (UNEP, 2006).

- a. Sistem air umpan (feed water system) merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan steam dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam boiler.

- b. Sistem steam(steam system) merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses produksi steam dan mengumpulkan berbagai data dalam boiler dengan cara mengalirkan uap ke titik pengguna dengan menggunakan sistem pemipaan.
- c. Sistem bahan bakar (fuel system) merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.4.1 Keuntungan dan Kerugian Ketel Pipa Air

Keuntungan-keuntungan ketel pipa air:

1. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dari pada ketel pipa api.
2. Untuk daya yang sama, menempati ruang/tempat yang lebih kecil daripada ketel pipa api.
3. Laju aliran uap lebih tinggi.
4. Komponen-komponen yang berbeda bisa diurai sehingga mudah untuk dipindahkan.
5. Permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus.
6. Pecah pada pipa air tidak menimbulkan kerusakan ke seluruh ketel.

Kerugian-kerugian ketel pipa air:

1. Air umpan mensaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa. Jika terbentuk kerak di dalam pipa bisa menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.
2. Ketel pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati bagi penguapannya, karena itu akan menimbulkan biaya operasi yang lebih tinggi.
3. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.

2.5 Prinsip Kerja Boiler

Air di dalam boiler dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar, sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air, yang mengakibatkan air tersebut menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam boiler. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke

dasar (Djokosetyardjo, 1990). Sistem boiler terdiri dari sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai kebutuhan uapnya. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Sistem bahan bakar merupakan semua alat yang digunakan dalam menyediakan bahan bakar agar menghasilkan panas yang dibutuhkan. Prinsip kerja boiler yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi energi yang dimiliki uap air. Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, boiler dapat diklasifikasikan menjadi boiler bahan bakar padat, boiler bahan bakar cair, dan boiler bahan bakar gas. Pemanas ruangan juga merupakan salah satu aplikasi dari boiler. Prinsip kerja pemanas ruangan dikembangkan berdasarkan Hukum Termodinamika I dan II.

Perpindahan panas pada kasus pemanas ruangan adalah memindahkan energi dalam bentuk panas dari suatu titik yang bersuhu tinggi ke titik yang bersuhu lebih rendah (Djojodihardjo, 1985).

2.6 Air Umpan Boiler

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* dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan kerja maksimum di dalam *boiler* (Djokosetyardjo, 1990).

Air yang disuplai ke *boiler* untuk diubah menjadi steam disebut air umpan (*feed water*). Terdapat dua sumber air umpan yaitu :

- a. *Steam* yang mengembun yang dikembalikan dari proses atau kondensat.
- b. Air baku yang sudah diolah yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan (*plant process*) yang disebut air *make up* (UNEP,2006)

Kualitas air umpan yang tidak baik (termasuk air *condensate*), akan menyebabkan korosi dan memicu timbulnya kerak atau jelaga pada komponen *boiler*.

2.7 Steam

Uap atau steam merupakan gas yang dihasilkan dari proses yang disebut penguapan. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan steam adalah air bersih. Air dari water treatment yang telah diproses dialirkan menggunakan pompa ke

deaerator tank hingga pada level yang telah ditentukan. Dengan meningkatnya suhu dan air telah mendekati kondisi didihnya, beberapa molekul mendapatkan energi kinetik yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuat sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang di atas permukaan, sebelum jatuh kembali ke cairan. Pemanasan lebih lanjut menyebabkan eksitasi lebih besar dan sejumlah molekul dengan energi cukup untuk meninggalkan cairan jadi meningkat. Dengan mempertimbangkan struktur molekul cairan dan uap, dapat diambil kesimpulan bahwa densitas steam lebih kecil dari air, sebab molekul steam terpisah jauh satu dengan yang lain. Ruang yang secara tiba-tiba terjadi di atas permukaan air menjadi terisi dengan molekul steam yang padat. Dalam hal ini pembakaran air dalam boiler adalah air yang melalui deaerator yang telah melalui pemanasan didalamnya yang dialirkan ke drum boiler (penampung steam) dan kemudian disuplai kedalam boiler untuk dipanaskan lebih lanjut sehingga menjadi steam basah..

Jika jumlah molekul yang meninggalkan permukaan cairan lebih besar dari yang masuk kembali, maka air akan menguap dengan bebas. Pada keadaan ini air telah mencapai titik didihnya atau suhu jenuhnya, yang dijenuhkan oleh energi panas. Jika tekananya tetap penambahan lebih banyak panas tidak mengakibatkan kenaikan suhu lebih lanjut namun menyebabkan air akan membentuk steam jenuh. Pada tekanan atmosfer suhu jenuh air adalah 100 °C, tetapi jika tekananya bertambah maka akan ada penambahan lebih banyak panas dan peningkatan suhu tanpa perubahan fase. Oleh karena itu, kenaikan tekanan secara efektif akan meningkatkan entalpi air dan suhu jenuhnya. Hubungan antara suhu jenuh dan tekanan dikenal sebagai kurva steam jenuh. Air dan steam dapat berada secara bersamaan pada berbagai tekanan dalam kurva ini, keduanya akan berada pada suhu jenuh. Steam pada kondisi di atas kurva jenuh dikenal dengan superheated steam (steam lewat jenuh), sedangkan air yang berada pada kondisi dibawah kurva disebut air sub-jenuh atau saturated steam.

Jika steam mengalir dari boiler pada kecepatan yang sama dengan yang dihasilkannya, penambahan panas lebih lanjut akan meningkatkan laju produksinya. Jika steam yang sama tertahan tidak meninggalkan boiler, dan jumlah panas yang masuk dijaga tetap, energi yang mengalir ke boiler akan lebih besar daripada energi yang mengalir keluar. Energi yang berlebih ini akan menaikkan tekanan, yang pada gilirannya akan menyebabkan suhu jenuh meningkat, karena suhu steam jenuh berhubungan dengan tekananya.

2.8 Dasar Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik yang menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem – sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.8.1 Hukum Termodinamika I

Bunyi hukum Termodinamika I adalah “Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya saja.” Berdasarkan uraian tersebut terbukti bahwa kalor (Q) yang diserap sistem tidak hilang. Oleh sistem, kalor ini akan diubah menjadi usaha luar (W) dan atau penambahan energi dalam (U) (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.8.2 Hukum Termodinamika II

Hukum kedua termodinamika dinyatakan dengan entropi. Pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan–perubahan yang diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan.

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuaian bebas dari gas) adalah proses spontan, sehingga proses itu disertai dengan kenaikan entropi. Proses irreversibel menghasilkan entropi, sedangkan proses reversibel adalah perubahan yang sangat seimbang, dengan sistem dalam keseimbangan dengan lingkungannya pada setiap tahap. Proses reversibel tidak menghasilkan entropi, melainkan hanya memindahkan entropi dari suatu bagian sistem terisolasi ke bagian lainnya (Atkins, 1999). Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya. Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang

dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada setiap siklus tanpa memperhatikan dari benda mana siklus itu mendapatkan energi melalui perpindahan kalor. Ketidaksamaan Clausius mendasari dua hal yang digunakan untuk menganalisis sistem tertutup dan volume atur berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi. Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram entropi sangat membantu untuk menentukan lokasi dan menggambarkan proses pada diagram dimana koordinatnya adalah nilai entropi. Diagram dengan salah satu sumbu koordinat berupa entropi yang sering digunakan adalah diagram temperatur-entropi (T-s).

2.8.3 Siklus Rankine

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus Rankine. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika, siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal. Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus Carnot dapat dicapai pada daerah uap basah dimana perubahan entalpi.

Fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperatur. Temperatur hanya diatur oleh tekanan uap fluida. Kerja pompa pada siklus Rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus Carnot. Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses : 1-2 kompresi isentropik dengan pompa 2-3 penambahan panas dalam boiler secara isobar 3-4 ekspansi isentropik pada turbin 4-1 pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isothermal Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi boiler. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki boiler sebagai cairan terkompresi (compressed liquid) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap superheated pada kondisi 3. Dimana panas diberikan ke boiler pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut steam generator. Uap superheated pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung

dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari steam akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana steam akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. Steam ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini (Cengel dan Boles, 1994 : 553).

2.9 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah karbon, hidrogen dan sulfur. Dalam proses suatu pembakaran jika tidak ada cukup oksigen, maka karbon tidak akan terbakar seluruhnya, contohnya sebagai berikut : $C + O_2 \rightarrow CO_2$ (Carbon terbakar sempurna) $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ (carbon tidak terbakar sempurna) Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” yaitu:

- a. T- Temperatur Temperatur yang digunakan untuk pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia.
- b. T- Turbulensi Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi.
- c. T- Time Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia. Dalam proses pembakaran tidak terlepas dari penyalaan yaitu sebuah keadaan transisi dari tidak reaktif ke reaktif karena rangsangan atau dorongan eksternal yang memicu reaksi termokimia diikuti dengan transisi yang cepat sehingga pembakaran dapat berlangsung. Penyalaan terjadi bila panas yang dihasilkan oleh pembakaran lebih besar dari panas yang hilang ke lingkungan. Dalam proses penyalaan ini dapat dipicu oleh energi thermal yang merupakan transfer energi thermal ke reaktan oleh konduksi, konveksi, radiasi atau kombinasi dari ketiga macam proses tersebut, Kimia yaitu dengan memasukan bahan kimia reaktif.

Temperatur adiabatik merupakan temperatur teoritis maksimum yang dicapai oleh produk-produk pembakaran bahan bakar dengan oksigen atau udara. Temperatur

adiabatik terjadi pada udara lebih sama dengan nol (kondisi stokiometrik). Namun temperatur adiabatik juga bisa tidak tercapai hal ini disebabkan oleh:

- a. kehilangan panas yaitu proses pembakaran tidak terjadi seketika. Pembakaran yang cepat akan mereduksi kehilangan panas. Akan tetapi jika pembakaran berjalan lambat maka gas terdinginkan dan akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna. terjadinya diasosiasi CO₂ dan H₂O pada temperatur diatas 3000F, CO₂ dan H₂O terdisosiasi dengan menyerap panas. Jika gas mendingin produk disosiasi berekombinasi dan melepas energi disosiasinya. Jadi panasnya tidak hilang akan tetapi temperatur nyala aktual lebih rendah. (hidayat: 2004).

2.9.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain AFR (Air Fuel Ratio), FAR (Fuel Air Ratio), dan Rasio Ekuivalen (ϕ).

2.9.2 Rasio Udara-Bahan Bakar (Air Fuel Ratio/AFR)

Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai adalah jumlah mol bahan bakar.

2.9.3 Rasio Bahan Bakar-Udara (Fuel Air Ratio/ FAR)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas, perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol.

2.9.4 Rasio Ekuivalen (Equivalent Ratio)

Rasio ini termasuk juga rasio yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stokiometri dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan

antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometri (Mahandri,2010:10).

2.10 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja *Cross Section Water Tube Boiler* adalah solar dan LPG. Berikut adalah pembahasan mengenai kedua jenis bahan bakar tersebut.

2.10.1 Solar Bahan bakar

Solar adalah bahan bakar minyak nabati hasil destilasi dari minyak bumi mentah. Bahan bakar ini berwarna kuning coklat yang jernih. Penggunaan solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm), yang juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pada pembakaran langsung dalam dapur-dapur kecil yang terutama diinginkan pembakaran yang bersih. Minyak solar ini biasa juga disebut Gas Oil, Automotive Diesel Oil, High Speed Diesel (Pertamina, 2005).

Bahan bakar solar mempunyai sifat-sifat utama, yaitu:

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- g. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin. Berikut spesifikasi solar dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Data Komposisi Bahan Bakar Solar

Komponen	% Komposisi (% berat)
C	79,39
H ₂	19,84
S	0,26
H ₂ O	0,51
Total	100

(Sumber : *Dirjen Minyak dan Gas Bumi, 2011*)