

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 mempunyai berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang mempunyai 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. Sistem bahan bakar merupakan semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar sehingga menghasilkan panas yang dibutuhkan. (MF Syahputra.2010).

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 kotoran baik yang ditimbulkan dari bahan bakar ataupun 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 Jenis-Jenis Boiler

2.2.1 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. Aliran 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 :

1. Kapasitas yang digunakan
2. Kondisi steam yang dibutuhkan
3. Bahan bakar yang dibutuhkan
4. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
5. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Kerugian ketel pipa api :

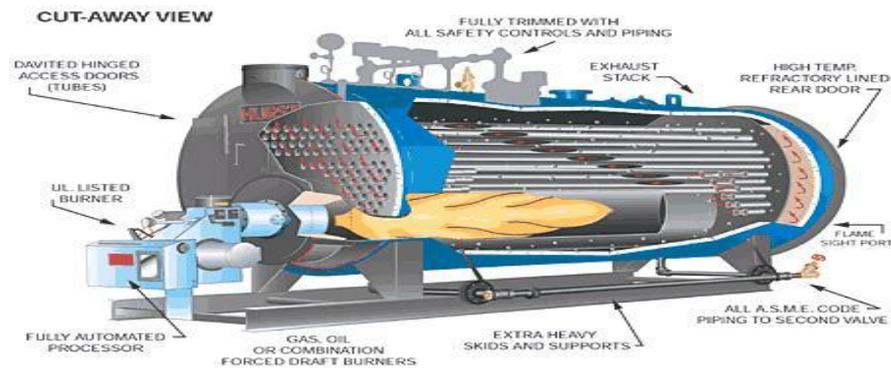
1. Tekanan steam hasil rendah
2. Kapasitas kecil
3. Pemanasan relatif lama

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 2.1.



Gambar 2.1 Boiler Pipa Api

(sumber: Okifianti.2015.Boiler dan Jenisnya)

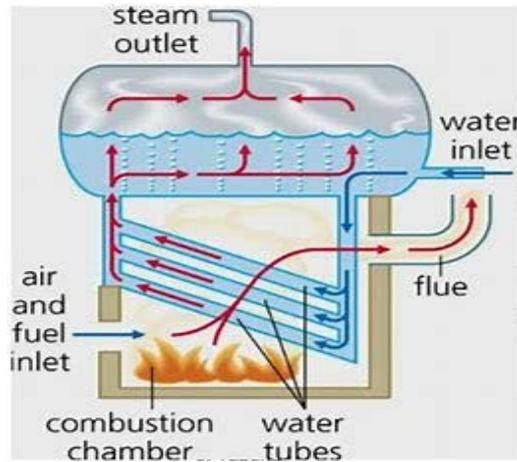
Boiler yang tergolong dalam jenis fire tube boiler adalah jenis boiler kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 Ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm^2 , jadi tergolong ke dalam boiler bertekanan rendah karena kapasitas, tekanan, dan temperature uap yang dihasilkan rendah maka fire tube boiler jarang digunakan untuk pengolahan modern. Kekurangannya adalah lambat untuk mencapai tekanan operasi pada awal operasi, dan keuntungan menggunakan boiler ini adalah fleksibel terhadap perubahan beban secara cepat (Dalimunthe, 2006).

2.2.2 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.

Di dalam 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 didesain dengan tekanan sangat tinggi serta memiliki kapasitas uap antara 4.500-12.000 kg/jam (UNEP, 2006).



Gambar 2.2.Boiler Pipa Air

(sumber:Okifianti.2015.BoilerdanJenisnya)

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 *steam* dalam jumlah besar dengan skala industri dengan *steam* 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.

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.

Kerugian-kerugian ketel pipa air :

1. Air umpan mensyaratkan 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.

2.3 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).

1. Sistem air umpan (*feed water system*) adalah sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan steam dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam boiler.
2. Sistem *steam* (*steam system*) adalah 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.
3. Sistem bahan bakar (*fuel system*) adalah sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.4 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, maka 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. 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.

2.5 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 *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) air umpan *boiler* dipompakan dari luar masuk ke dalam *boiler* dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan maksimum di dalam *boiler* (Djokosetyardjo, 1990).

Air yang disuplai ke *boiler* untuk dirubah 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 dan 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*.

2.6 Saturated Steam dan Superheated Steam

Ketika sistem berada pada keadaan cairan jenuh, tambahan panas pada tekanan tetap menghasilkan pembentukan uap tanpa perubahan suhu tetapi dengan peningkatan volume spesifik yang cukup besar. Ketika campuran uap-cair ada dalam kesetimbangan, fase cair adalah cairan jenuh dan fase uap adalah uap jenuh. Jika air dipanaskan lebih lanjut sampai sedikit cairan terakhir yang menguap maka keadaan menjadi uap jenuh.

Uap lanjut dari penguapan cairan disebut uap jenuh (*saturated steam*) sepanjang temperatur dan tekanan uap sama seperti cairan jenuh yang terjadi. Uap jenuh dapat digambarkan juga sebagai uap pada temperatur dimana pendinginan

uap lanjut disebabkan oleh sebagian uap mengembun dan dengan cara tersebut struktur molekul cairan kembali lagi. Hal tersebut penting untuk dipahami bahwa temperatur jenuh benda cair (temperatur pada waktu cairan akan menguap jika panas ditambahkan) dan temperatur jenuh uap (temperatur pada saat uap akan mengembun jika panas dibuang) akan memberikan tekanan yang sama dan cairan tidak akan cair lagi pada temperatur di atas temperatur jenuh, sedangkan uap tidak akan tetap uap pada temperatur di bawah temperatur jenuh.

Uap pada temperatur di atas temperatur jenuh adalah uap panas lanjut. Jika setelah penguapan, uap dipanaskan sehingga temperatur naik di atas penguapan cairan, uap dikatakan panas lanjut (*superheated*). Uap panas lanjut diperlukan untuk memisahkan uap dari penguapan cairan. Sepanjang uap tetap berhubungan dengan cairan, maka akan tetap jenuh. Hal tersebut disebabkan adanya penambahan panas pada campuran uap-cairan yang hanya akan menguap lebih lanjut adalah cairan dan tidak ada *superheating* yang terjadi.

2.7 Dasar Termodinamika Pada Boiler

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).

2.7.1 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika I merupakan penerapan kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, meskipun energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya dengan total energinya sama. Bila diberikan panas (dQ) pada suatu sistem, maka sistem akan berekspansi dan melakukan kerja sebesar (dW) dan menimbulkan penambahan kecepatan molekul dari sistem serta pertambahan jarak antara molekul-molekul dari sistem karena sistem berekspansi. Energi total dari suatu sistem disebut sebagai energi dalam (U). Energi dalam adalah sifat keadaan, artinya nilai energi dalam bergantung hanya pada keadaan akhir sistem dan tidak bergantung pada

cara pencapaian keadaan itu. Energi dalam mempunyai dua sifat lebih lanjut, yaitu:

1. Energi dalam sistem yang terisolasi adalah tetap. Pengamatan ini sering diringkas dengan ucapan bahwa energi bersifat kekal. Bukti kekekalan energi adalah kemustahilan untuk membuat mesin yang bergerak terus menerus, yang bekerja tanpa bahan bakar; mustahil untuk menciptakan atau menghancurkan energi.
2. Sifat kedua energi dalam adalah perpindahan energi (karena kita dapat melihat apakah beban dinaikkan atau diturunkan dalam lingkungannya, atau apakah es sudah meleleh). Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem.

Kedua sifat energi ini diringkas menjadi pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika diubah dengan melakukan kerja atau pemanasan (Atkins, 1999). Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh panas harus sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur. Secara matematis dapat dilihat pada Persamaan (1) (Daryus, 2007):

$$Q = \Delta U + W \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Q : kalor yang dipindahkan
- ΔU : perubahan energi dalam
- W : kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

2.7.2 Hukum Termodinamika II

Hukum Termodinamika II timbul berdasarkan pernyataan oleh:

1. Clausius, bahwa: “adalah tidak mungkin bagi sistem apapun untuk beroperasi sedemikian rupa sehingga hasil tunggalnya akan berupa suatu perpindahan energi dalam bentuk kalor dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas”
2. Kelvin Planck, bahwa: “tidak mungkin menggunakan proses siklus untuk memindahkan panas dari benda panas dan mengubahnya menjadi kerja tanpa memindahkan sebagian panasnya kepada benda dingin pada saat yang sama”

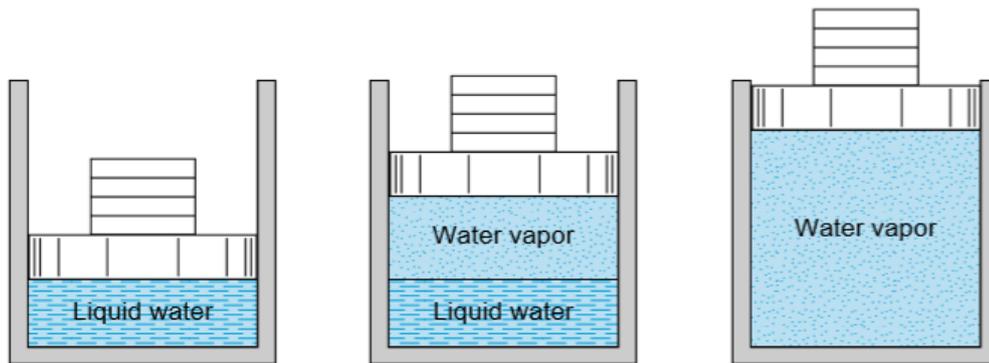
3. Weber, bahwa: “adalah panas tidak dapat mengalir dari benda yang suhunya rendah ke suhu yang tinggi, kecuali ditambah energi dari luar sistem untuk mengubah benda tersebut”

Sehingga dapat dinyatakan bahwa bunyi Hukum Termodinamika II yaitu kalor mengalir secara alami dari benda yang panas ke benda yang dingin; kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda panas tanpa dilakukan usaha. Hukum termodinamika II mendefinisikan konsep termodinamika entropi. Entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan. 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.

2.7.3 Studi Perubahan Fasa

Zat murni adalah zat yang memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak berubah-ubah. Kondisinya mungkin ada dalam satu fase, tetapi komposisi kimianya sama di semua fase. Jadi, air cair, campuran air dan uap air dan campuran es dan air semuanya adalah zat murni; setiap fase memiliki komposisi kimia yang sama. Sebaliknya, campuran udara cair dan udara kering bukan zat murni karena komposisi fasa cair berbeda dari fasa uap (*Claus Borgnakke, 2009*).

Temperatur saturasi merupakan suhu ketika penguapan terjadi pada tekanan tertentu. Tekanan ini disebut tekanan saturasi untuk temperatur yang diberikan. Dengan demikian, untuk air pada 99.6°C tekanan saturasi adalah 0.1 Mpa, dan untuk pada 0.1 Mpa temperatur saturasi adalah 99.6°C (*Claus Borgnakke, 2009*). Zat murni mempunyai hubungan yang pasti terhadap tekanan dan temperatur saturasi. Jika suatu zat ada sebagai cairan pada suhu dan tekanan saturasi, itu disebut cairan jenuh. Jika suhu cairan lebih rendah dari dari suhu saturasi tekanan yang ada, itu disebut *sub-cooled liquid* atau cairan terkompresi.



Gambar 2.3. Perubahan Tekanan Konstan untuk Zat Murni

(Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*)

Ketika suatu zat sebagai cair dan uap sebagian pada suhu jenuh, kualitasnya didefinisikan sebagai rasio massa uap terhadap massa total. Uap air pada suhu saturasi disebut sebagai uap jenuh. Ketika uap air berada pada suhu lebih besar dari suhu saturasi maka ada sebagian atau seluruhnya merupakan uap panas lanjut (*superheated steam*). Tekanan dan suhu uap panas lanjut (*superheated steam*) adalah sifat yang independen karena suhu lebih rendah dibandingkan dengan tekanan yang konstan (Claus Borgnakke, 2009).

Identifikasi fase dari zat murni berdasarkan susunan molekulnya menurut Tresna Mustikasari (2013) meliputi:

1. *Solid* : Jarak antar molekul sangat dekat menyebabkan gaya tarik antar molekul sangat kuat, maka bentuknya tetap. Gaya tarik antara molekul-molekul cenderung untuk mempertahankannya pada jarak yang relatif konstan. Pada temperatur tinggi molekul melawan gaya antar molekul dan terpecah
2. *Liquid* : Susunan molekul mirip dengan zat padat, tetapi dengan yang lain sudah tidak tetap lagi. Sekumpulan molekul akan mengambang satu sama lain.
3. Gas : Jarak antar molekul berjauhan dan tersusun secara acak. Molekul bergerak secara acak.

Menurut Tresna Mustikasari (2013), perubahan fase dari zat murni secara termodinamika terdapat lima keadaan. Perubahan tersebut meliputi:

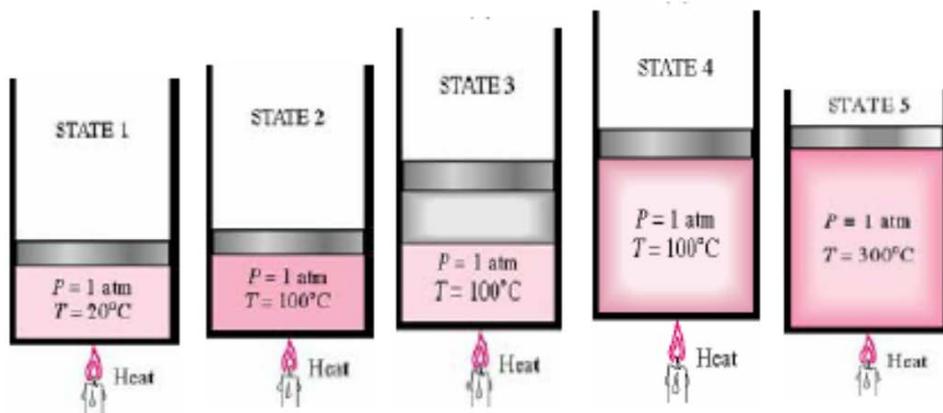
Keadaan 1: Pada keadaan ini disebut *compressed liquid* atau *subcooled liquid*. Pada keadaan ini penambahan kalor hanya akan menaikkan temperatur tetapi belum menyebabkan penguapan

Keadaan 2: disebut *saturated liquid* (cairan jenuh). Pada keadaan ini fluida tepat akan berubah fasanya. Penambahan kalor sedikit saja menyebabkan terjadi penguapan dan akan mengalami sedikit penambahan volume.

Keadaan 3: disebut "*Saturated liquid-vapor mixture*" (campuran uap-cairan jenuh). Pada keadaan ini uap dan cairan jenuh berada dalam kesetimbangan. Penambahan kalor tidak akan menaikkan temperatur tetapi hanya menambah sejumlah penguapan.

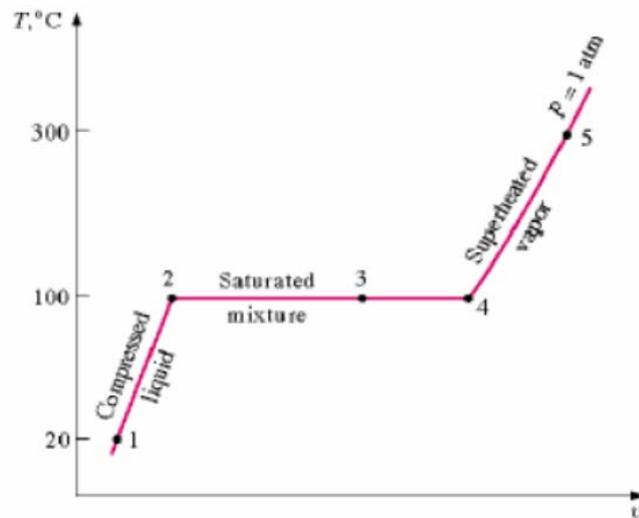
Keadaan 4: campuran berubah jadi uap seluruhnya, disebut "*saturated vapor*" (uap jenuh). Pada keadaan ini pengurangan kalor akan menyebabkan terjadi pengembunan.

Keadaan 5: disebut "*superheated vapor/steam*" (uap panas lanjut). Penambahan kalor menyebabkan kenaikan suhu dan volume.



Gambar 2.4. Pemanasan Air pada Tekanan Konstan

Proses tersebut dapat digambarkan dalam diagram T-v pada Gambar 2.5. Diagram ini menggambarkan perubahan-perubahan temperatur dan volume jenis.



Gambar 2.5. Diagram T-v Perubahan Fase pada Tekanan Konstan

2.8 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.

2. *Burner*

Prinsipnya *burner* adalah alat yang digunakan dalam proses pembakaran bahan bakar sehingga menghasilkan sumber panas yang diperlukan . Fungsi utama *burner* yaitu :

- a. Mensuplai bahan bakar ke ruang bakar.
- b. Mensuplai udara ke ruang pembakaran.
- c. Mencampur udara ke *fuel*.
- d. Memberikan nyala api dan membakar campuran udara *fuel*.
- e. Memberikan hasil pembakaran

3. *Steam Drum*

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

4. *Superheater*

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

5. Kondensor

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

6. *Safety valve*

Komponen ini merupakan saluran buang *steam* jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan boiler menahan tekanan *steam*.

7. *Blowdown valve*

Komponen ini merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa *steam*.

8) *Water Drum*

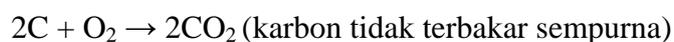
Drum bawah berfungsi sebagai tempat pemanasan air ketel yang didalamnya dipasang plat-plat pengumpul endapan lumpur untuk memudahkan pembuangan keluar (*Blowdown*). Selain itu, *water drum* juga berfungsi sebagai tempat pengendapan kotoran-kotoran air dalam ketel, yang tidak menempel pada dinding ketel, melainkan terlarut dan mengendap.

Peralatan-peralatan itu antara lain adalah :

- 1) Instrumentasi yang berfungsi mengukur, mengatur dan mengamankan operasi sebagai pengontrol kestabilan proses operasi *boiler*.
- 2) *Feed water pump* yang berfungsi untuk memompakan air ke *boiler*
- 3) Kompresor yang berfungsi untuk memproduksi udara bertekanan sebagai kebutuhan alat instrument *boiler*.

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 :



Pembakaran akan dikatakan sempurna apabila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat, hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran kurus dan hasil pembakarannya menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (tidak cukup oksigen), dikatakan campuran kaya sehingga pembakaran ini menghasilkan api reduksi.

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. Supaya proses pembakaran suatu zat terjadi, maka temperatur dari zat tersebut harus berada pada suatu harga tertentu yang cukup untuk memulai terjadinya reaksi.

b. T- Turbulensi

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan oksidator. Oksigen di dalam udara yang dialirkan ke ruang bakar ada kemungkinan dapat langsung mengalir ke cerobong tanpa kontak dengan bahan bakar. Hal semacam ini dapat dihindari dengan cara memusarkan aliran udara. Turbulensi udara akan membentuk pencampuran yang baik antara udara bahan bakar sehingga akan diperoleh proses pembakaran yang sempurna.

c. T- Time

Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia. Setiap reaksi kimia memerlukan waktu tertentu untuk pembakaran.

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 termal yang merupakan

transfer energi termal ke reaktan oleh konduksi, konveksi, radiasi atau kombinasi dari ketiga macam proses tersebut.

2.9.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

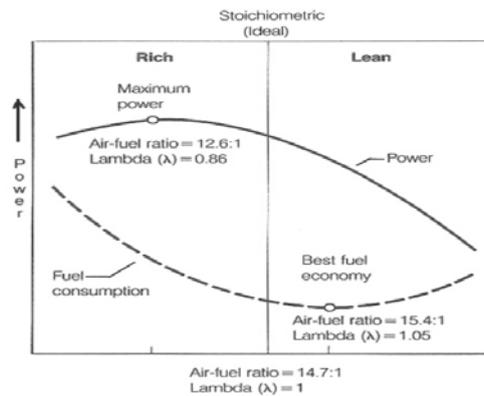
Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. kebutuhan udara dan bahan dinyatakan dengan rasio campuran udara dan bahan bakar AFR (*Air Fuel Ratio*).

Rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR) adalah rasio massa udara terhadap bahan bakar padat, cair, atau gas yang ada dalam proses pembakaran. 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 perbandingan jumlah massa udara dengan jumlah massa bahan bakar.

$$AFR = \frac{m_a}{m_f}$$

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

AFR sangat berpengaruh terhadap panjang nyala api. Panjang nyala api berkebalikan dengan AFR yakni AFR meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api yang diusulkan oleh Rokke. Persamaan Rokke menunjukkan korelasi antara panjang nyala yang sebanding dengan fraksi massa bahan bakar. Semakin turun nilai AFR berarti fraksi massa bahan bakar semakin tinggi sehingga panjang nyala api juga meningkat dan bahan bakar semakin banyak yang tidak terbakar.



Gambar 2.6 Grafik Stoikiometrik Rasio Udara Bahan Bakar

2.9.2 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas (*kalor*). Proses pembakaran merupakan proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Proses pembakaran yang terjadi didalam *furnace* boiler bertujuan untuk merubah fasa air menjadi fasa uap (Hasibuan dan Napitupulu, 2013).

Bahan bakar yang digunakan *boiler* digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu: Bentuk padat, bentuk cair, dan bentuk gas. (Maulana dan Sulaksmo, 2014). Pada prinsipnya ketiganya memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing, namun saat ini industri dengan skala besar lebih memilih bahan bakar gas sebagai bahan bakar utama, dikarenakan memiliki efektifitas yang tinggi dan tidak menimbulkan kotor pada permukaan pembakaran. Berikut ini adalah jenis bahan bakar yang digunakan oleh *boiler* :

1. Bahan Bakar Padat (Batubara)

Batubara merupakan bahan bakar jenis batuan sedimen berwarna coklat gelap yang dapat terbakar terdiri dari konsolidasi dan senyawa daripada tumbuhan yang tumbuh di hutan. Komposisi kimia batubara bervariasi dari satu daerah ke daerah yang lain, tergantung pada vegetasi dari yang dibentuk dan kondisi lingkungan yang terkena formasi lingkungan. Batubara mempunyai kandungan kimia utama yaitu karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen, batubara juga mengandung air dan kotoran yang abu, merkuri, dan belerang (Oland, 2002).

2. Bahan Bakar Cair (Minyak)

Minyak bumi dan gas alam saling bersaing dan saling melengkapi batubara, sehingga memungkinkan meluasnya industrialisasi sebagaimana yang dapat

dilihat saat ini karena batubara merupakan benda yang berat, besar dan kotor, maka batubara terutama mendapatkan pasaran sebagai bahan bakar *stationer*, atau untuk mesin-mesin kecepatan rendah. Bahan bakar cair tergolong mudah dalam penggunaannya, ditambah dengan efisiensi panas yang tinggi. Selain itu, bahan bakar cair lebih mudah di distribusikan dan mudah dalam penanganan, hal ini membuat bahan bakar cair yaitu minyak bumi sebagai salah satu bahan bakar yang paling sering digunakan khususnya untuk kendaraan bermotor. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik. Bahan bakar cair memiliki nilai kalor pembakaran yang cenderung konstan sehingga memudahkan untuk mengontrol suatu alat pembakaran, dan dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi.

3. Bahan Bakar Gas

Gas alam merupakan bahan bakar hidrokarbon yang tidak berwarna yang utamanya terdiri dari metana (CH_4) dan etana (C_2H_6), pada prinsipnya dua komponen yang mudah terbakar. Keduanya biasanya ditemukan di bawah permukaan bumi dalam batu berpori yang formasinya tidak keropos. Ketika mengebor sebuah sumur minyak yang dibor melalui pembentukan gas alam, yang berada di bawah tekanan, mengalir ke permukaan di mana gas tersebut didistribusikan menggunakan jaringan pipa ke fasilitas pengolahan. Hal ini membuat kebanyakan *boiler* menggunakan gas alam dikarenakan dapat disalurkan langsung ke *boiler* dan memiliki efisiensi yang tinggi serta tidak menghasilkan abu pembakaran. Selain kemudahan distribusi, penggunaan *boiler* gas alam membutuhkan ruang *boiler* relatif kecil, sehingga tidak terlalu banyak mengeluarkan material untuk membuatnya. Dengan nilai kalor sekitar 1.000 Btu/ft³ dalam kondisi standar dari 60°F pada tekanan atmosfer dan persyaratan berlebih pada udara rendah yang berkontribusi untuk efisiensi tinggi, gas alam adalah bahan bakar yang ideal (Oland, 2002). Dalam pembuatan Cross Section Water Tube Boiler ini, kami menggunakan bahan bakar Gas LPG karna tidak memungkinkannya penginstalasian pipa gas alam ke dalam *boiler*. Adapun spesifikasi LPG dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Spesifikasi LPG

<i>Description</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Specific Gravity at 60/60 °F</i>	<i>To be reported</i>	
<i>Vapour pressure 100°F psig</i>	-	120
<i>Weathering test at 36°F %Vol</i>	95	-
<i>Copper Corrosion 1 hrs 100 ° F</i>	-	<i>ASTM No.1</i>
<i>Total Sulphur, grains/100 cuft</i>	-	
<i>Water content</i>	<i>Free of water</i>	<i>Free of water</i>
<i>Komposisi :</i>		<i>D-2163 Test</i>
<i>C2 % vol</i>	-	0.2
<i>C5 + (C5 and heavier) % vol</i>	97.5	-
<i>thyl or Buthyl mercaptan added ml/100 AG</i>		50

(sumber: Pertamina, 2015)

2.10 Perpindahan Kalor

Perpindahan Kalor adalah bentuk kalor yang dapat berpindah dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah. Sedangkan kalor ini merupakan suatu bentuk energi atau dapat juga didefinisikan sebagai jumlah panas yang ada dalam suatu benda. 2.9.1 Macam-macam Perpindahan Kalor Perpindahan dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui 3 cara, yaitu Konduksi, Konveksi dan Radiasi. Panas yang timbul karena pembakaran bahan bakar tersebut disebut hasil pembakaran atau nilai bakar (*heating value*). Nilai kalor (*heating value*) adalah jumlah panas yang diperoleh melalui proses pembakaran 1 kg bahan bakar (Hasibuan dan Napitupulu, 2013). Pembakaran bahan bakar baik bahan bakar padat, cair dan gas memiliki nilai kalor yaitu dengan jumlah panas yang diperoleh bila jumlah bahan bakar terbakar dengan sempurna. Jumlah kilo *Joule* (kJ) yang dihasilkan pada pembakaran sempurna suatu bahan bakar tiap kg atau tiap m³ (Bruijn dan Muilwijk, 1982). Jumlah udara pembakaran yang menurut teori diperlukan untuk membakar secara sempurna suatu bahan bakar, dapat dihitung

dari susunan kimia bahan bakar tersebut. Pada umumnya zat yang terkandung dalam sulfur dan zat asam diabaikan.

2.10.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana molekul-molekul dari zat perantara tidak ikut berpindah tempat tetapi molekul-molekul tersebut hanya menghantarkan panas atau proses perpindahan panas dari suhu yang tinggi ke bagian lain yang suhunya lebih rendah. Konduksi (keadaan steady). Suatu material bahan yang mempunyai gradient, maka kalor akan mengalir tanpa disertai oleh suatu gerakan zat. Aliran kalor seperti ini disebut konduksi atau hantaran. Konduksi thermal pada logam - logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi thermal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan yang terjadi pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul (McCabe,1993). Contoh perpindahan kalor secara konduksi antara lain: perpindahan kalor pada logam cerek pemasak air atau batang logam pada dinding tungku. Laju perpindahan panas secara konduksi sebanding dengan gradien suhu perpindahan panas secara konduksi sebanding dengan gradien suhu (McCabe,1993).

$$\frac{q}{a} \sim \frac{\delta T}{\delta x} \dots\dots\dots(1)$$

Dan dengan konstanta kesetimbangan (konduksi) maka menjadi persamaan Fourier

$$q = - k A \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

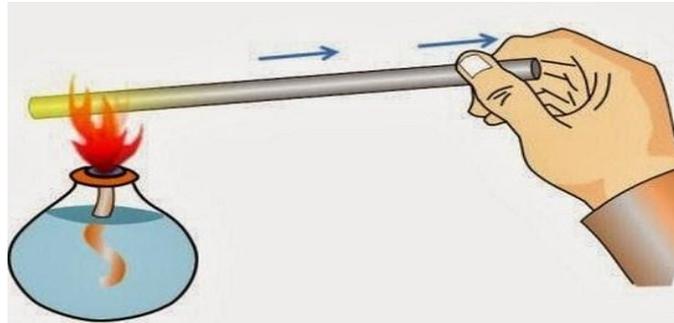
q = laju perpindahan kalor

$\frac{\delta T}{\delta x}$ = gradient suhu kearah perpindahan kalor

k = konduktivitas termal

A = luas permukaan bidang hantaran

Tanda (-) digunakan untuk memenuhi hukum II Termodinamika yaitu “Panas mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperature” (Holman,1986).



Gambar 2.7 Perpindahan Panas Konduksi

(sumber:Belajarbagus.net)

2.10.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara ikut bergerak mengalir dalam perambatan panas atau proses perpindahan panas dari satu titik ke titik lain dalam fluida antara campuran fluida dengan bagian lain. Arus fluida yang melintas pada suatu permukaan, maka akan ikut terbawa sejumlah enthalphi. Aliran enthalphi ini disebut aliran konveksi kalor atau konveksi. Konveksi merupakan suatu fenomena makroskopik dan hanya terjadi bila ada gaya yang bekerja pada partikel atau ada arus fluida yang dapat membuat gerakan melawan gaya gesek (McCabe, 1993). Contoh sederhana perpindahan panas secara konveksi adalah aliran air yang dipanaskan dalam belanga. Panas yang dipindahkan secara konveksi dinyatakan dengan persamaan Newton tentang pendinginan (Holman, 1986).

$$q = - h.A.\delta T \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

q = Kalor yang dipindahkan

h = Koefisien perpindahan kalor secara konveksi

A = Luas bidang permukaan perpindahan panas

T = Temperatur

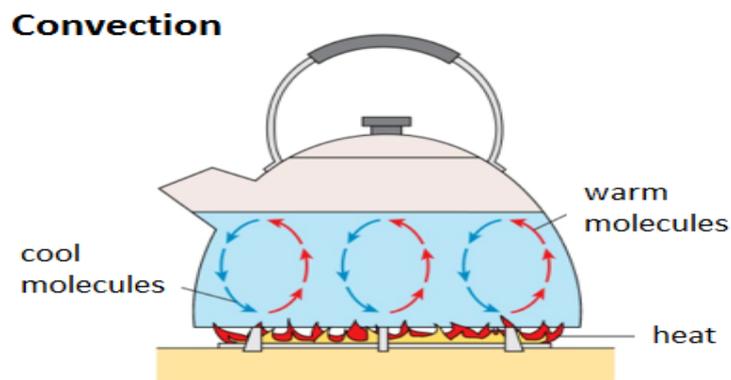
Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II Thermodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+). Berdasarkan gaya penyebab terjadinya arus aliran fluida, konveksi dapat diklasifikasikan:

1. Konveksi Bebas (*Natural Convection*)

Konveksi bebas merupakan proses perpindahan panas yang berlangsung secara alamiah, dimana perpindahan panas dalam molekul-molekul dalam zat yang dipanaskan terjadi dengan sendirinya tanpa adanya tenaga dari luar. Konveksi alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi karena ada perbedaan densitas fluida tanpa dipengaruhi gaya dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran udara yang melintasi radiator panas (McCabe,1993).

2. Konveksi Paksa (*Forced Convection*)

Konveksi paksa merupakan proses perpindahan panas yang terjadi karena adanya bantuan dari luar, misalnya pengadukan. Jika dalam suatu alat tersebut dikehendaki pertukaran panas, maka perpindahan panas terjadi secara konveksi dipaksa karena laju panas yang dipindahkan naik dengan adanya pengadukan.



Gambar 2.8 Perpindahan Panas Konveksi

(sumber: Myrightspot.com)

2.10.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena perpindahan energi melalui gelombang elektromagnetik secara pancaran. Antara sumber energi dengan penerima panas tidak terjadi kontak, bagian dapur yang terkena radiasi adalah ruang pembakaran. Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan), dan absorpsi (diserap) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, sebagai contoh memantulkan sebagian besar radiasi yang jatuh padanya, sedangkan permukaan yang berwarna hitam dan tidak mengkilap akan menyerap radiasi yang diterima dan diubah menjadi kalor. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari. Menurut hukum Stefan Boltzmann tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa panas yang dipantulkan (dari benda hitam) dengan laju alir yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan benda (Artono Koestoer,2002).

$$q \text{ pancaran} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \dots\dots\dots(4)$$

Dimana: σ = konstanta proporsionalitas (tetapan Stefan Boltzmann)

$$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

A = luas permukaan bidang benda hitam

T = temperatur absolut benda hitam

2.11 Enthalpy

Enthalpy adalah energi yang terkandung dalam sistem pada keadaan tekanan konstan. Dalam persamaan energi untuk kedua proses aliran dan non-aliran dapat terlihat bahwa istilah (U+pV) berulang kali terjadi. Istilah ini dinamakan *enthalpy* dengan simbol H. Dalam sistem aliran simbol pV merupakan aliran energi, tetapi dalam sebuah sistem non-aliran merupakan tekanan dan volume, memiliki satuan energi tetapi tidak mewakili energi.

1. *Enthalpy* Air, *Enthalpy* Cairan atau Panas Sensibel Air (H_f)

Ini merupakan energi panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air dari titik dasar 0°C ke suhu saat itu. Pada referensi suhu 0°C , entalpi air dianggap nol. Panas sensibel merupakan panas yang ditambahkan ke air yang mengakibatkan perubahan suhu. Namun istilah yang digunakan pada saat ini adalah entalpi cairan atau entalpi air. Pada tekanan atmosfer, air mendidih pada suhu 100°C , dan diperlukan energi sebesar 419 KJ untuk memanaskan 1 kg air dari 0°C ke titik didihnya.

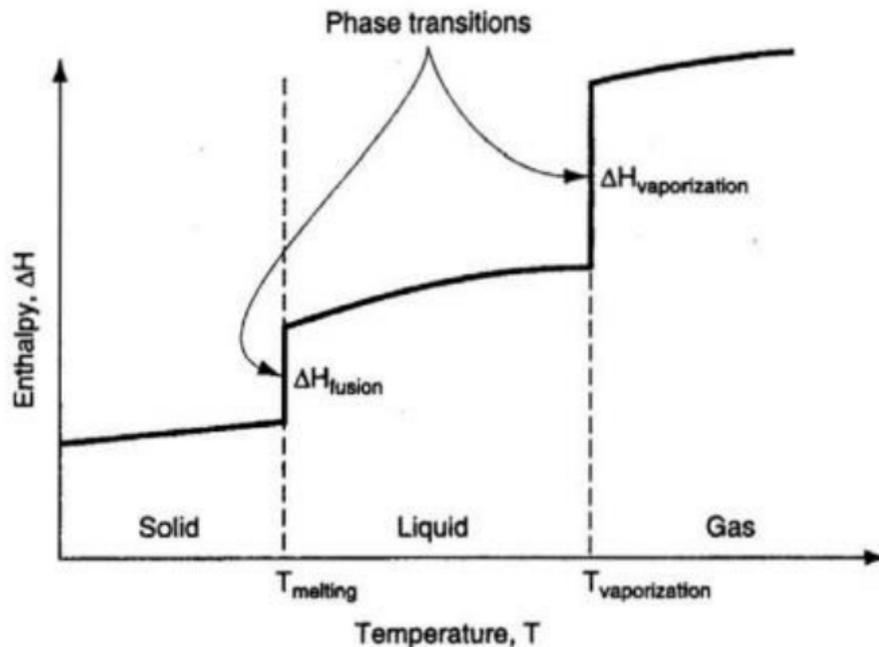
2. *Enthalpy* Penguapan atau Panas Laten (H_{fg})

Panas laten merupakan jumlah panas yang diperlukan untuk mengubah air pada suhu didihnya menjadi steam. Perubahan ini tidak melibatkan perubahan pada suhu campuran *steam*/air, dan seluruh energi digunakan untuk mengubah keadaan dari cairan (air) ke uap (*saturated steam*).

3. *Enthalpy Saturated Steam*, atau Panas Total *Saturated Steam*

Enthalpy Saturated Steam, atau Panas Total *Saturated Steam* merupakan energi total dari enthalpy cairan dan enthalpy penguapan ($H_g = H_f + H_{fg}$).

Perubahan *enthalpy* terjadi dari fasa padat ke cair hingga menjadi gas dan sebaliknya. Pada proses perubahan enthalpy yang terjadi pada temperatur tetap disebut panas laten. Perubahan enthalpy pada fasa yang sama disebut panas sensibel. Hubungan temperatur terhadap enthalpy dapat dilihat pada Gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2.9. Diagram Temperatur-Enthalpy pada Perubahan Fasa

Transisi Fasa terjadi dari fasa padat menjadi fasa cair, dari fasa cair menjadi fasa gas dan sebaliknya. Pada proses transisi ini terjadi perubahan *enthalpy* (dan energi dalam) dimana terjadi pada temperatur tetap yang disebut panas laten. Perubahan enthalpy pada fasa yang sama disebut dengan panas sensibel.

Jenis-jenis panas laten:

- a) Panas peleburan (*Heat of Fusion*) (ΔH_{fusion})
Terjadi pada perubahan fasa dari padat ke cair
- b) Panas Pematatan
Terjadi pada perubahan fasa dari cair ke padat
- c) Panas Penguapan (*Heat of Vaporization*) (ΔH_v)
Terjadi pada perubahan fasa dari cair ke gas
- d) Panas Kondensasi (*Heat of Condensation*)

Terjadi pada perubahan fasa dari gas ke cair.