

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Boiler

Boiler adalah suatu bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana & Askhabulyamin, 2012). Panas pembakaran ini kemudian dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap. Air panas atau uap pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk proses industri. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air dididihkan sampai volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali, menghasilkan tenaga yang menjadi *steam* menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan sangat baik (UNEP, 2006). *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

2.2 Klasifikasi Boiler

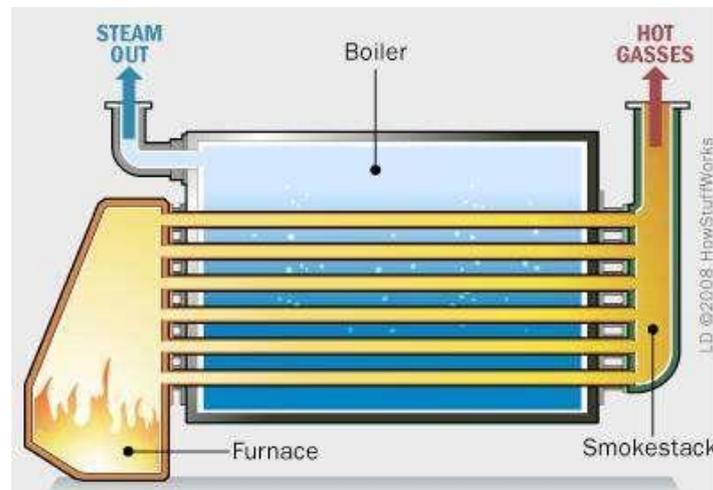
Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbung (drum) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air (Muin, 1988). Berikut adalah beberapa macam klasifikasi *boiler*.

2.2.1 Ketel Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Pada *fire tube boiler* seperti tampak pada Gambar 2.1, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada di dalam *shell* untuk dirubah menjadi steam. *Fire tube boilers* biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* yang relatif kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, *fire tube boilers* kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm² (UNEP, 2006).

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 temperatur 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).



Gambar 2.1 Ketel Pipa Api

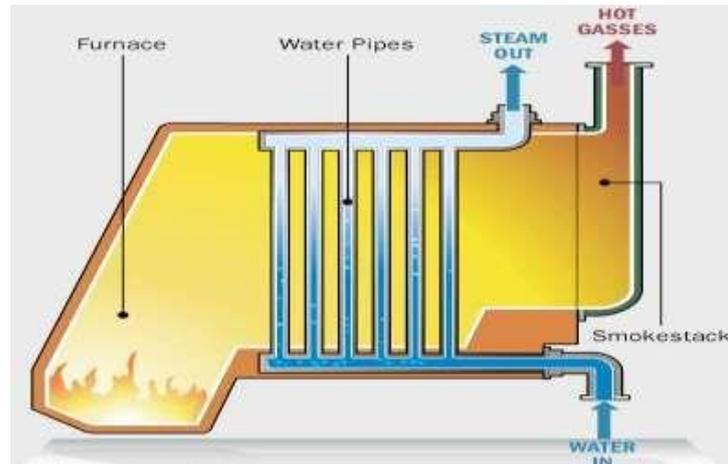
Sumber : science.howstuffworks.com/Fire Tube Boiler

2.2.2 Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Pada *water tube boiler* seperti tampak pada Gambar 2.2, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga. *Water tube boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas steam antara 4.500 – 12.000 kg/jam, dengan tekanan sangat tinggi (UNEP, 2006).

Prinsip kerja *water tube boiler* yaitu proses pengapian terjadi di luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa berisi air. *Steam* yang dihasilkan dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam sebuah *steam drum*.

Sampai tekanan dan temperatur sesuai, *saturated steam* dipanaskan lagi oleh *superheater* untuk menghasilkan *superheated steam* hingga mengalir ke *outlet* sistem sebagai *superheated steam* melalui pipa distribusi. Bahan bakar yang banyak digunakan pada *boiler* jenis ini adalah minyak solar dan gas.



Gambar 2.2 Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Sumber : [science.howstuffworks.com/Water Tube Boiler](http://science.howstuffworks.com/Water-Tube-Boiler)

Apabila kapasitas *boiler* lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi lebih besar dari 24 bar, maka *boiler* dianggap cocok untuk produksi uap dalam jumlah besar dengan skala industri yang dihasilkan yaitu *superheated* (Dalimunthe 2006). Penggunaan *water tube boiler* diakui memiliki keuntungan yang lebih karena reaksi konversi air menjadi uap dan transfer panas yang terjadi lebih cepat. *Boiler* jenis ini menjadi pilihan yang digunakan oleh unit pengolahan yang sudah modern karena dapat menghasilkan uap dengan kapasitas, temperatur dan tekanan yang tinggi sesuai dengan kebutuhan. Tekanan operasi *boiler* jenis ini mencapai 100 bar serta nilai efisiensinya lebih tinggi dibandingkan jenis *fire tube boiler*. Selain itu, pemeliharaan *water tube boiler* ini juga lebih mudah.

2.3 Komponen Boiler

Adapun komponen-komponen utama yang menyusun boiler adalah sebagai berikut:

a. Burner

Burner berfungsi mencampur bahan bakar dengan perbandingan tertentu, sehingga reaksi pembakaran dapat berjalan dengan baik dan bahan bakar yang terbakar dapat menghasilkan energi panas yang maksimal (Prameswari, 2017).

b. *Steam Drum*

Steam drum merupakan tempat menampung *steam* sekaligus memisahkan antara uap dan air (Prameswari, 2017).

c. *Water Tube*

Water tube merupakan pipa-pipa yang dilewati air di dalam *boiler* digunakan sebagai tempat pemanasan air (Prameswari, 2017).

d. *Furnace*

Furnace (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan kedalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap (Prameswari, 2017).

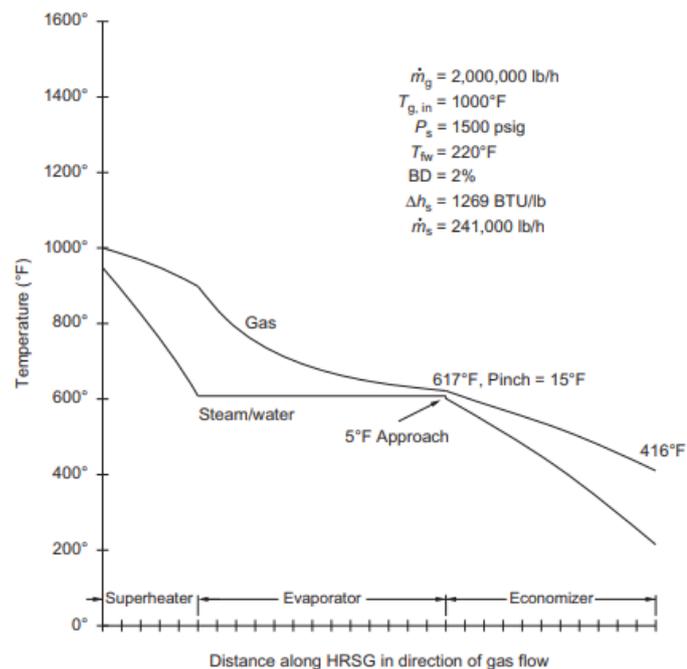
f. *Superheater Tube*

Superheater tube berfungsi untuk memanaskan uap jenuh (*saturated steam*) menjadi uap lanjut (Prameswari, 2017).

2.3.1 Sistem Superheater

Superheater merupakan suatu komponen dalam *boiler* yang digunakan untuk memanaskan lanjut uap saturasi sampai dihasilkan uap yang benar – benar kering. Pemanasan lanjut berguna untuk menjaga agar uap tidak mengembun pada waktu penyebaran di dalam turbin sehingga dapat mengurangi tekanan balik yang diakibatkan oleh mengembunnya uap sebelum waktunya. Prinsip kerja perpindahan panas *superheater* di PLTU terjadi secara konduksi dan konveksi. Uap yang dihasilkan dari ruang bakar dan *water wall Heat Recovery Area* (HRA) meninggalkan *steam drum* sebagai uap jenuh kemudian dipanaskan menjadi uap panas lanjut (Septiani, 2015).

Entalpi spesifik *superheated steam* pada 200°C dengan tekanan atmosfer adalah 2875,41 kJ / kg, sedangkan entalpi spesifik steam jenuh pada tekanan yang sama 2675 kJ / kg. Ini berarti *steam* lewat jenuh dalam hal ini, telah hanya 7,5% lebih entalpi dari steam jenuh. Demikian, uap *superheated* pada 300° C dan 400° C memiliki 14% dan 22,5% lebih banyak entalpi dibandingkan dengan *steam* jenuh pada tekanan atmosfer (Janfada dkk, 2020).



Gambar 2.3 Distribusi Temperatur dari *Superheater*, *Evaporator* dan *Economizer*

Sumber : *Fundamentals* (Eriksen, 2017)

Pada dasarnya temperatur pada *superheater* harus dijaga supaya selalu mencapai *set point*, agar sesuai dengan temperatur yang digunakan untuk memutar turbin. Bila temperatur uap kurang dari *set point* yang ditentukan maka akan menjadi uap basah sehingga dapat menyebabkan korosi pada turbin. Begitu juga jika temperatur melebihi *set point*, maka akan menjadi uap kering yang membahayakan bagi turbin serta bahan bakar akan terbuang sia-sia. Oleh karena itu, jika temperatur melebihi *set point*, sistem akan menstabilkan temperatur *superheater* sehingga mencapai suhu yang diinginkan (Septiani, 2015).

2.4 Prinsip Kerja Boiler

Prinsip kerja boiler yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi energi yang dimiliki uap air. 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 (Djokosetyoardjo, 1990).

Sistem yang dimiliki boiler untuk memenuhi kebutuhan *steam* terbagi menjadi beberapa sistem, antara lain sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar (UNEP, 2006).

A. Sistem Air Umpan

Sistem air umpan merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam *boiler*.

B. Sistem *steam*

Sistem *steam* 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

Sistem bahan bakar merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.5 Termodinamika

Termodinamika dapat didefinisikan sebagai ilmu dari energi. Energi dapat diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan perubahan. Termodinamika berasal dari kata Yunani yaitu *theme* (panas) dan *dynamis* (kekuatan) yang merupakan penjelasan deskriptif dari upaya awal untuk mengubah panas menjadi tenaga. Termodinamika mencakup semua aspek perubahan energi, termasuk pembangkit listrik, sistem pendinginan dan hubungan di antara sifat-sifat materi (Cengel & M.Boles, 2002).

2.5.1 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika Pertama menyatakan bahwa energi itu lestari. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Hukum Termodinamika Pertama disebut juga Hukum Kekekalan Energi. Walaupun energi terdapat dalam berbagai bentuk, jumlah energi total adalah konstan, dan bila

energi hilang dalam satu bentuk, energi ini timbul dalam bentuk yang lain secara bersama-sama (Pudjanarso & Djati, 2013).

2.5.2 Hukum Termodinamika II

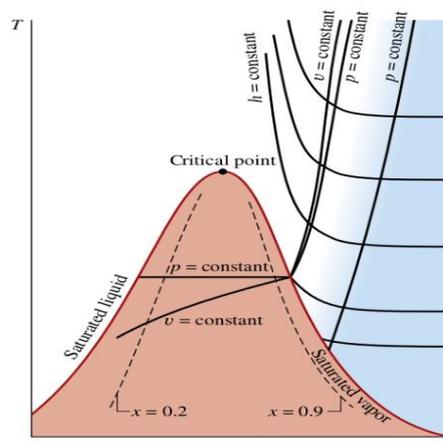
Hukum kedua termodinamika dinyatakan dengan entropi. Pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu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

$$\Delta S_{\text{tot}} \geq 0 \dots \dots \dots (1)$$

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. 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. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa (Moran & Saphiro, 2006) :

$$dS = \frac{dQ}{T} \dots \dots \dots (2)$$

Di mana dQ mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus, T adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Sedangkan dS dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai 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).

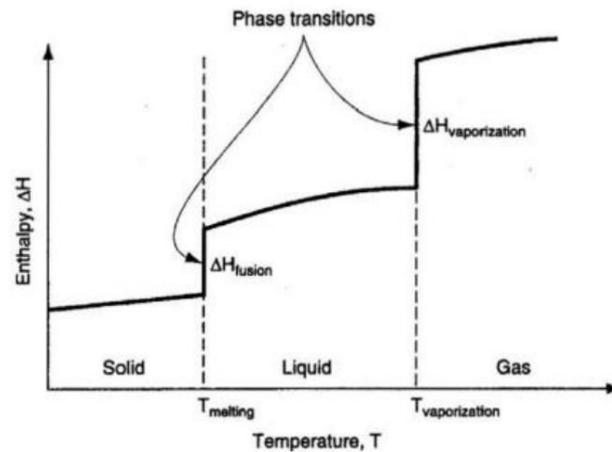


Gambar 2.4 Diagram Temperatur dan Entropi
 Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006

2.5.3 Entalpi

Entalpi 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 entalpi 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.

Perubahan entalpi terjadi dari fasa padat ke cair hingga menjadi gas dan sebaliknya. Pada proses perubahan entalpi yang terjadi pada temperatur tetap disebut panas laten. Perubahan entalpi pada fasa yang sama disebut panas sensibel. Hubungan temperatur terhadap entalpi dapat dilihat pada Gambar 2.4.

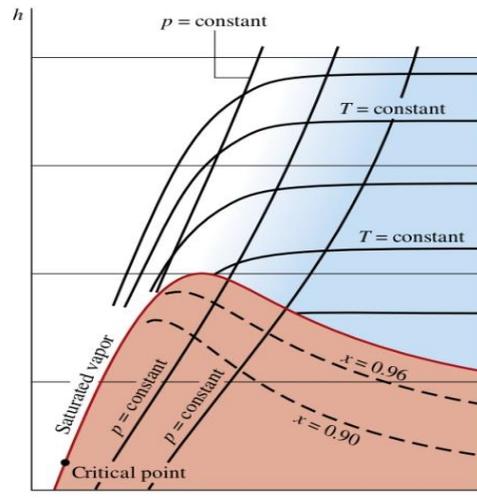


Gambar 2.5 Diagram Temperatur-Entalpi

2.5.4 Hubungan Entalpi-Entropi

Entropi adalah sifat keadaan sistem yang menyatakan tingkat ketidakteraturan. Entropi juga dapat didefinisikan sebagai kecenderungan sistem untuk berproses ke arah tertentu. Entropi dapat dihasilkan, tetapi tidak dapat dimusnahkan. Hubungan antara entalpi-entropi ditunjukkan oleh diagram $h-s$ atau disebut juga dengan diagram Mollier yang terlihat pada Gambar 2.5. Garis-garis kualitas konstan ditunjukkan pada daerah campuran fase cair-uap. Grafik ini digunakan untuk mendapatkan nilai sifat pada keadaan uap panas lanjut dan untuk campuran dua fase cair-uap. Data cairan umumnya jarang tersedia. Pada daerah uap panas lanjut, garis temperatur konstan mendekati horizontal pada saat tekanan

berkurang yang ditunjukkan pada daerah tearsir di Gambar 2.5 (Moran & Saphiro, 2006).

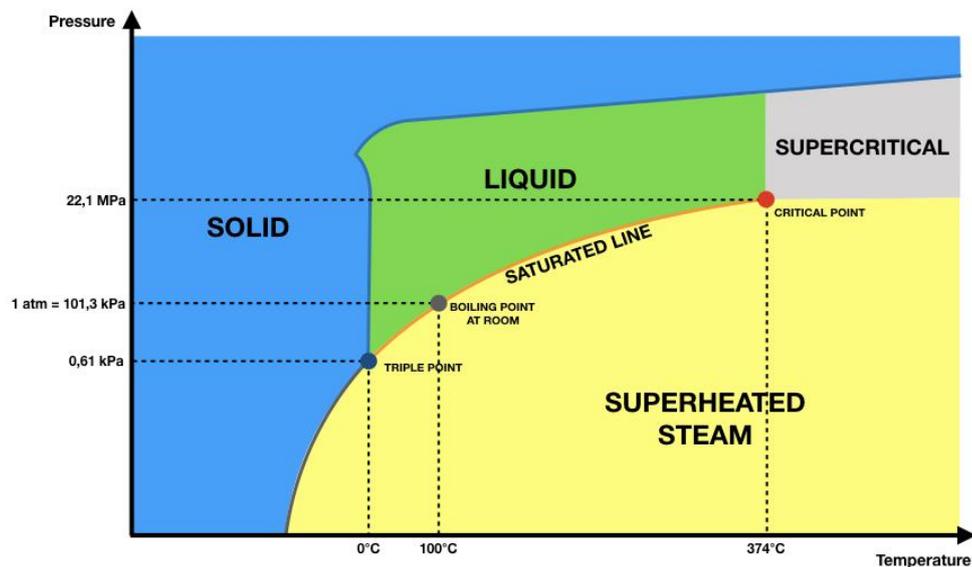


Gambar 2.6 Diagram Entalpi-Entropi

Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006

2.6 Diagram Fase Air

Diagram fase adalah sebuah diagram yang menunjukkan perubahan-perubahan fase fisika dari suatu zat pada berbagai kondisi temperatur dan tekanan. Maka diagram fase air adalah sebuah diagram tekanan-temperatur yang menunjukkan perubahan-perubahan fisika air pada berbagai kondisi.



Gambar 2.7 Diagram Fase Air

Sumber : <https://artikel-teknologi.com/diagram-fase-air/>

Pada diagram fase air tersebut, terbentuk tiga buah kurva yang menjadi batas antara tiga fase fisika air. Kurva pertama menunjukkan batas antara fase padat dengan fase gas, kurva kedua menjadi batas antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva ketiga menjadi batas antara fase cair dengan gas. Khusus kurva ketiga ini disebut dengan istilah *saturated line* (garis saturasi). Garis saturasi memiliki fase yang dikenal dengan nama uap saturasi. Di sepanjang garis saturasi, berapapun besar tekanan dan temperatur, air dan uap air dapat berada di dalam satu kondisi yang sama dengan perbandingan kuantitas sesuai dengan nilai entalpi yang dikandungnya.

Tiga kurva yang membentuk diagram fase air kemudian bertemu di sebuah titik yang dikenal sebagai *triple point*. *Triple point* merupakan sebuah titik di mana tiga fase fisika air yaitu padat, cair, dan gas, dapat berada di satu kondisi ekuilibrium. Berdasarkan kesepakatan, temperatur yang ditetapkan sebagai titik tripel air adalah 273,16 K (492,69 °R). Tekanan terukur pada titik tripel air adalah 0,6113 kPa (0,00602 atm) (Moran & Saphiro, 2006).

Di atas *triple point*, terdapat dua percabangan kurva dengan fungsi masing-masing. Satu kurva membatasi antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva lainnya membatasi antara fase cair dengan gas. Di ujung kurva saturasi ini terdapat satu titik yang disebut sebagai *critical point*. *Critical point* adalah sebuah titik yang menjadi batas akhir dari kurva ekuilibrium fase cair dan gas sehingga dapat berada pada satu kondisi tekanan dan temperatur yang sama. *Critical point* air berada pada tekanan 22,1 MPa dan temperatur 374°C.

2.6.1 Uap (*Steam*)

Keadaan uap tergantung dari tekanan, oleh karena itu pembentukan uap diadakan pada tekanan konstan. Bila 1 kg air dipanaskan dengan temperatur mula 0°C di dalam tangki tertutup dengan tekanan konstan, pada pemanasan tingkat pertama temperatur air akan naik sampai air mendidih dan dikenal sebagai temperatur didih. Setelah temperatur didih dicapai, uap mulai terbentuk selama temperatur dipertahankan konstan, sampai dicapai titik di mana semua air berubah menjadi uap. Isi tangki akan berupa campuran air dan uap yang disebut sebagai uap basah. Dan bila semua air termasuk butir-butir yang terapung dalam uap

basah itu diuapkan dan pemanasan dilanjutkan temperatur uap basah itu naik dan uap ini dikenal sebagai uap kering (Pitrandjalisari & Toni, 2013).

Steam atau uap air adalah sejenis fluida yang mengalami perubahan fase dari air ke gas, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih di bawah tekanan tertentu. Uap air terbentuk dalam tiga jenis, yaitu uap saturasi (*saturated steam*), uap saturasi kering (*superheated steam*), uap superkritis (*supercritical steam*).

a) Uap Saturasi (*Saturated Steam*)

Uap saturasi adalah sebuah kondisi dimana uap air berada dalam satu kondisi ekuilibrium tekanan dan temperatur dengan air fase *liquid* (cair). Dengan kata lain, uap saturasi merupakan uap yang masih basah, yang masih tercampur dengan molekul-molekul air berfase cair. Pada diagram fase air, fase uap saturasi ditunjukkan hanya berupa garis kurva saturasi yang menjadi batas antara air *liquid* dengan uap *superheated*.

b) Uap Panas Lanjut (*Superheated Steam*)

Uap panas lanjut adalah sebuah fase air yang telah melewati fase saturasi dengan menyerap lebih banyak energi panas, sehingga keseluruhan fluida air sudah memiliki fase gas murni. Uap panas lanjut memiliki kandungan energi panas tinggi, serta sangat populer digunakan sebagai sumber penggerak turbin uap pada pembangkit-pembangkit tenaga listrik.

c) Uap Superkritis (*Supercritical Steam*)

Uap superkritis adalah sebuah fase air yang berada dalam kondisi di atas titik kritis air yakni tekanan 22,1 MPa dan temperatur 374°C. Ada dua ciri khas dari uap superkritis adalah ia tidak memiliki nilai panas laten, serta nilai spesifik volume yang sama antara air dan uap superkritis. Dapat dikatakan pula bahwa fase uap superkritis ini memiliki fase yang tidak dapat dibedakan antara cair dan gas.

2.7 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. Oksigen (O_2) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20.9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah ke bentuk gas sebelum dibakar. Biasanya diperlukan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Hampir 79% udara (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran (UNEP, 2006).

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan tiga T” pembakaran” 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 (UNEP, 2006).

2.7.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dua parameter yang sering digunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar dan udara dalam proses pembakaran tertentu adalah rasio udara dan bahan bakar (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.

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} \dots\dots\dots(3)$$

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.

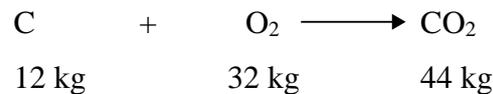
2.7.2 Kebutuhan Udara Teoritis

Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara:

- a. berdasarkan pada satuan berat
- b. berdasarkan pada satuan volume.

Pada suatu analisis pembakaran selalu diperlukan data-data berat molekul dan berat atom dari unsur-unsur yang terkandung dalam bahan bakar.

A. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat



Ini berarti bahwa setiap massa karbon memerlukan 32 kg oksigen secara teoritis untuk membakar sempurna karbon menjadi karbondioksida. Apabila oksigen yang dibutuhkan untuk membakar masing-masing unsur pokok dalam bahan bakar dihitung lalu dijumlahkan, maka akan ditemukan kebutuhan oksigen teoritis yang dibutuhkan untuk membakar sempurna seluruh bahan bakar. Oleh karena itu untuk memperoleh harga kebutuhan oksigen teoritis yang sebenarnya maka dibutuhkan oksigen yang telah dihitung berdasarkan persamaan reaksi pembakaran kemudian dikurangi dengan oksigen yang terkandung dalam bahan bakar (PT PLN, 2006).

B. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

Apabila dalam suatu analisis bahan bakar dinyatakan dalam persentase berdasar volume, maka suatu perhitungan yang serupa dengan perhitungan berdasarkan berat bisa digunakan untuk menentukan volume dari udara teoritis yang dibutuhkan. Untuk menentukan udara teoritis harus memahami Hukum Avogadro yaitu “gas-gas dengan volume yang sama

pada suhu dan tekanan standar (0°C dan tekanan sebesar 1 Bar) berisikan molekul dalam jumlah yang sama” (PT PLN, 2006).

2.7.3 Udara Berlebih

Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O₂ yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari:

- Komposisi gas buang yang meliputi N₂, CO₂, O₂ dan CO
- Pengukuran secara langsung udara yang disuplai.

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{udara suplai} - \text{udara teoritis}}{\text{udara teoritis}} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

Sumber: Olaf A Hougen, 1943

Untuk pembakaran yang optimum, jumlah udara pembakaran yang sesungguhnya harus lebih besar daripada yang dibutuhkan secara teoritis. Bagian dari gas buang mengandung udara murni, yaitu udara berlebih yang ikut dipanaskan hingga mencapai suhu gas buang dan meninggalkan boiler melalui cerobong. Analisis kimia gas-gas merupakan metode objektif yang dapat membantu untuk mengontrol udara dengan lebih baik. Dengan mengukur CO₂ atau O₂ dalam gas buang (menggunakan peralatan pencatat kontinyu atau peralatan Orsat atau beberapa peralatan *portable* yang murah) kandungan udara berlebih dan kehilangan di cerobong dapat diperkirakan. Udara berlebih yang dibutuhkan tergantung pada jenis bahan bakar dan sistim pembakarannya (UNEP, 2006).

2.7.4 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas (kalor). Proses pembakaran merupakan proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Proses pembakaran merupakan yang terjadi di dalam ruang bakar *boiler* bertujuan untuk merubah fase air menjadi fase uap (Hasibuan, 2013).

A. Bahan Bakar 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 (di atas 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*. 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.
- h. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.

Berikut tabel spesifikasi solar dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Solar

No.	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji ASTM
			Min.	Maks.	
1	Bilangan cetana				
	Angka cetana	-	51	-	D 613-95
	Indeks cetana	-	48	-	D 4737 - 96a
2	Berat Jenis (pada 15°C)	kg/m ³	82	860	D 445 - 97
3	Viskositas (pada suhu 15°C)	mm ² /s	2	4,5	D 445 - 97
4	Kandungan sulfur	% mm	-	0,05	D 2622 - 98
5	Distilasi				
	T = 90°C	°C	-	340	
	T = 95°C	°C	-	360	
	Titik didih akhir	°C	-	370	
6	Titik Nyala		55	-	D 93 799c
7	Titik Tuang			18	D 97
8	Residu Karbon	% mm		0,3	D 4530 - 93
9	Kandungan Air	mg/kg		500	D 1744 - 92
10	Stabilitas Oksidasi	g/m ³	-	25	D 2274 - 94

(Sumber : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2006)

2.8 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah ilmu yang berhubungan dengan laju pertukaran benda yang bersuhu tinggi (panas) ke suhu yang lebih rendah (dingin). Perpindahan kalor dari suatu tempat ke tempat yang lain melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi (McCabe, 1993).

2.8.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas di mana 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 termal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi termal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul (McCabe, 1993).

2.8.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi/aliran adalah proses perpindahan panas melalui molekul-molekul fluida cair atau gas. Bila suatu sumber pipa baja yang panas di liri oleh fluida, maka fluida tersebut akan menghantar panas ke seluruh bagian fluida. Perpindahan panas secara konveksi dapat dibagi atas dua golongan, yaitu :

a. Konveksi Alami

Konveksi alami merupakan proses perpindahan panas yang berlangsung secara alamiah, di mana perpindahan panas dalam molekul-molekul zat yang dipanaskan terjadi dengan sendirinya tanpa adanya tenaga dari luar. Konveksi bebas/alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi 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).

b. Konveksi Paksa

Konveksi paksa adalah perpindahan panas konveksi dengan menggunakan media pembantu untuk lebih mempercepat laju aliran fluida, 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 (McCabe, 1993).

2.8.3 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. Menurut hukum Stefan Boltzmann tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan (dari benda hitam) dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan benda (Koestoer, 2002).