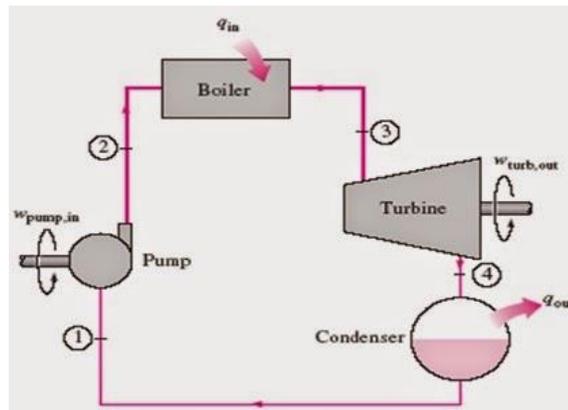


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu dari jenis pembangkit, dimana pembangkit ini memanfaatkan uap yang dihasilkan oleh *boiler* sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin dan sekaligus memutar generator sehingga akan dihasilkan tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga uap yang sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu *boiler*, turbin uap, kondensor dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap dapat ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap

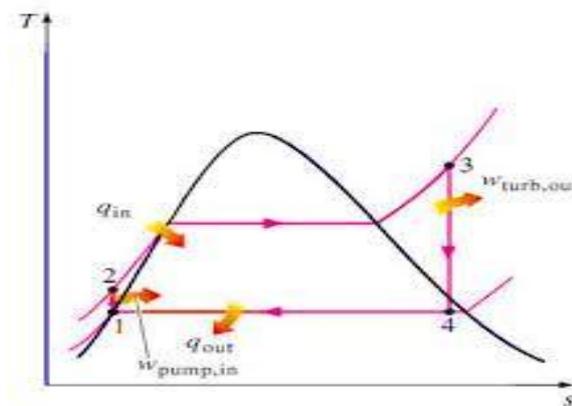
Sumber : Sigit Bagus Setiawan, 2014

2.2 Siklus *Rankine* Ideal

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 ada

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 dapat digambarkan dalam diagram T-S dan H-S seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. Siklus *Rankine* Sederhana

Sumber: Bitha, 2011

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 (*saturated liquid*) 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 oleh *boiler* ke air pada tekanan yang tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan *steam* ini disebut sebagai *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 kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondensor dan akan meninggalkan kondensor sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

2.3 Analisis Energi Pada Sistem Pembangkit Listrik

Perpindahan kalor yang tidak dapat dihindari antara komponen pembangkit dan sekelilingnya diabaikan untuk memudahkan analisis. Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan. Setiap komponen dianggap beroperasi pada kondisi tunak (*steady*). Dengan menggunakan prinsip konservasi massa dan konservasi energi bersama-sama dengan idealisasi tersebut maka akan dikembangkan persamaan untuk perpindahan energi pada masing-masing komponen pembangkit.

1. Pompa

Kondensat cair yang meninggalkan kondenser pada kondisi 1 dipompa dari kondenser ke dalam *boiler* sehingga tekanannya naik. Dengan menggunakan volume atur disekitar pompa dan mengasumsikan tidak ada perpindahan kalor disekitarnya, kesetimbangan laju massa dan energi adalah

$$(q - w) = (h_1 - h_2) + ((v_1^2 - v_2^2) / 2) + g (z_1 - z_2) \dots\dots\dots (1)$$

atau

$$W_p = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (2)$$

Dimana w_p adalah tenaga masuk per unit massa yang melalui pompa.

2. Boiler

Fluida kerja meninggalkan pompa pada kondisi 2 yang disebut air-pengisian, dipanaskan sampai jenuh dan diuapkan di dalam *boiler*. Dengan menggunakan volume atur yang melingkupi tabung *boiler* dan drum yang mengalirkan air-pengisian dan kondisi 2 ke kondisi 3, kesetimbangan laju massa dan energi menghasilkan

$$Q_m = h_3 - h_2 \dots\dots\dots (3)$$

Dimana Q_m adalah laju perpindahan kalor dari sumber energi ke dalam fluida kerja per unit massa yang melalui *boiler*.

3. Turbin

Uap dari *boiler* pada kondisi 3, yang berada pada temperatur dan tekanan yang sudah dinaikkan, berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja dan kemudian dibuang ke kondenser pada kondisi 4 dengan tekanan yang relatif rendah. Dengan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, kesetimbangan laju energi dan massa untuk volume atur di sekitar turbin pada kondisi lunak menjadi

$$W_t = h_3 - h_4 \dots \dots \dots (4)$$

Dimana m menyatakan laju aliran massa dari fluida kerja, dan w_t adalah laju kerja yang dihasilkan per unit massa uap yang melalui turbin.

4. Kondensor

Dalam kondensor terjadi perpindahan kalor dari uap ke air pendingin yang mengalir dalam aliran yang terpisah. Uap terkondensasi dan temperatur air pendingin meningkat. Pada kondisi tunak, kesetimbangan laju massa dan energi untuk volume atur yang melingkupi bagian kondensasi dan penukar kalor adalah

$$q_{out} = h_4 - h_1 \dots \dots \dots (5)$$

Dimana q_{out} merupakan laju perpindahan energi dari fluida kerja ke air pendingin per unit massa fluida kerja yang melalui kondensor.

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk ke dalam fluida kerja yang masuk ke dalam *boiler* yang dikonversi menjadi kerja netto.

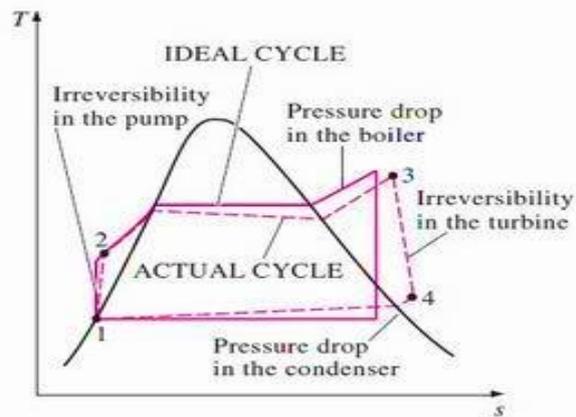
$$n_{th} = \frac{W_t - W_p}{q_m} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \dots \dots \dots (6)$$

Pada kenyataannya terdapat penyimpangan dalam siklus Rankine yang terjadi karena:

1. Adanya friksi fluida yang menyebabkan turunnya tekanan di *boiler* dan kondenser sehingga tekanan *steam* saat keluar *boiler* sangat rendah sehingga kerja yang dihasilkan turbin (w_{out}) menurun dan efisiensinya

menurun. Hal ini dapat diatasi dengan meningkatkan tekanan fluida yang masuk.

2. Adanya kalor yang hilang ke lingkungan sehingga kalor yang diperlukan (Q_m) dalam proses bertambah sehingga efisiensi termalnya berkurang.



Gambar 4. Siklus *Rankine* ideal dan aktual

Sumber: Nazar Siklus Rankine, 2012

Penyimpangan ini terjadi karena adanya irreversibilitas yang terjadi pada pompa dan turbin sehingga pompa membutuhkan kerja (w_{in}) yang lebih besar dan turbin menghasilkan kerja (w_{out}) yang lebih. Efisiensi pompa dan turbin yang mengaloi irreversibilitas dapat dihitung dengan:

$$n_p = \frac{W_s}{W_a} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_{2a} - h_1)} \dots \dots \dots (7)$$

$$n_t = \frac{W_a}{W_s} = \frac{(h_3 - h_{4a})}{(h_3 - h_{4s})} \dots \dots \dots (8)$$

2.4 Sifat – sifat Udara

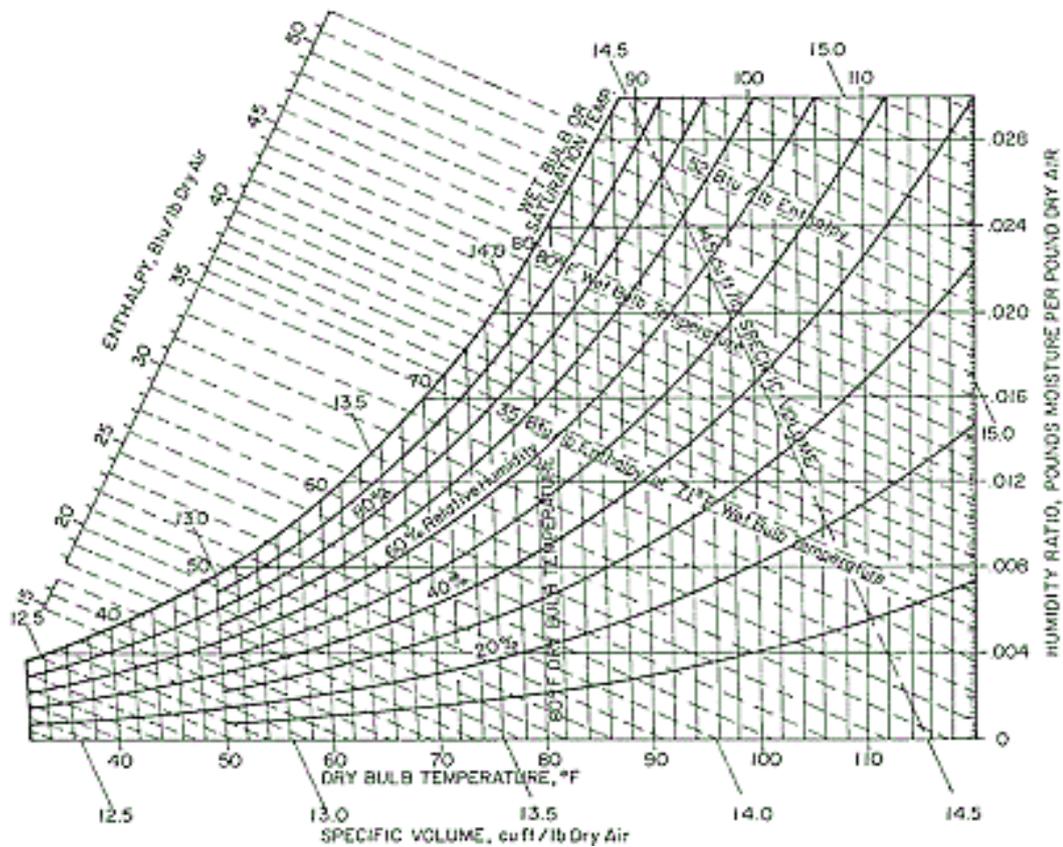
Dalam keadaan udara kering komposisi unsur – unsur gas yang terdapat pada atmosfer terdiri atas unsur nitrogen (N_2) 78%, oksigen (O_2) 21%, karbondioksida (CO_2) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O_3), hidrogen (H_2), helium (He), neon (Ne), xenon (Xe), krypton (Kr), radon (Rn), metana, dan ditambah unsur uap air dalam jumlah yang berbeda-beda sesuai dengan ketinggian tempat.

2.4.1 Kelembaban Udara (*Humidity*)

Kelembaban Udara (*humidity gauge*) adalah jumlah uap air di udara (atmosfer). Kelembaban adalah konsentrasi uap air di udara. Angka konsentrasi ini dapat diekspresikan dalam kelembaban absolut, kelembaban spesifik atau kelembaban relatif. Alat yang digunakan untuk mengukur kelembaban disebut dengan Higrometer. Sebuah humidistat digunakan untuk mengatur tingkat kelembaban udara dalam sebuah bangunan dengan pengawal lembab (*dehumidifier*).

Selain itu, kelembaban udara adalah tingkat kebasahan udara karena dalam udara air selalu terkandung dalam bentuk uap air. Kandungan uap air dalam udara panas lebih banyak daripada kandungan uap air dalam udara dingin. Jika udara banyak mengandung uap air didinginkan maka, suhunya turun dan udara tidak dapat menahan lagi uap air sebanyak itu. Uap air berubah menjadi titik –titik air. Udara yang mengandung uap air sebanyak yang dapat dikandungnya disebut udara jenuh.

Dapat dianalogikan dengan sebuah termometer dan termostat untuk suhu udara. Perubahan tekanan sebagian uap air di udara berhubungan dengan perubahan suhu. Konsentrasi air di udara pada tingkat permukaan laut dapat mencapai 3% pada 30°C (86°F) dan tidak melebihi 0,5% pada 0°C (32°F). Ada dua istilah kelembaban udara yaitu kelembaban tinggi dan kelembaban rendah. Kelembaban tinggi adalah jumlah uap air yang banyak di udara, sedangkan kelembaban rendah adalah jumlah uap air yang sedikit di udara.



Gambar 5. *Psychrometric Chart and Air Characteristic*

Sumber: Psychrometric Chart (<http://kawur.blogspot.co.id/2009/06/basic-air-conditioning-systems-design.html>)

2.4.2 Jenis – jenis Kelembaban Udara

Kelembaban udara dapat dinyatakan sebagai kelembaban udara absolut, kelembaban nisbi (relatif), maupun defisit tekanan uap air. Kelembaban absolut adalah kandungan uap air yang dapat dinyatakan dengan massa uap air atau tekanannya per satuan volume (kg/m^3). Kelembaban nisbi (relatif) adalah perbandingan kandungan (tekanan) uap air actual dengan keadaan jenuhnya (g/kg). defisit tekanan uap air adalah selisih antara tekanan uap jenuh dengan tekanan uap aktual.

1. Kelembaban Mutlak/ Absolut

Kelembaban absolut mendefinisikan massa dari uap air pada volume tertentu campuran atau gas dan umumnya dalam satuan gram per meter kubik (g/m^3) aatau dengan banyaknya uap air dalam setiap unit volume udara.

2. Kelembaban Nisbi (RH)

Kelembaban relatif/nisbi yaitu perbandingan jumlah uap air di udara dengan yang terkandung di udara pada suhu yang sama. Kelembaban nisbi membandingkan antara kandungan/ tekanan uap air aktual dengan keadaan jenuhnya atau kapasitas udara untuk menampung uap air.

Kelembaban nisbi (RH) mempunyai dua pengertian, yaitu:

- a. Perbandingan jumlah uap air yang secara aktual dengan jumlah uap air maksimum yang mampu dikandung oleh setiap unit volume udara dalam suhu yang sama. Untuk mencari kelembaban nisbi digunakan rumus sebagai berikut:

$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P^*_{H_2O}} \times 100 \% \dots\dots\dots(9)$$

Dimana:

- RH adalah kelembaban relatif campuran,
 - $P_{(H_2O)}$ adalah tekanan parsial uap air dalam campuran,
 - $P^*_{(H_2O)}$ adalah tekanan uap jenuh air pada temperatur tersebut dalam campuran.
- b. Banyaknya tekanan uap yang ada secara aktual dengan tekanan uap maksimum pada suhu yang sama. Seperti kelembaban spesifik yaitu banyaknya uap air yang terkandung dalam 1 kg udara

2.5 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu zat yang jika dipanaskan akan mengalami reaksi kimia dengan oksidator (biasanya oksigen dalam udara) untuk melepaskan panas. Bahan bakar komersial mengandung karbon, hidrogen, dan senyawa-senyawanya. Sehingga sering disebut bahan bakar hidrokarbon yang akan menghasilkan suatu nilai kalor (*heating value*). Berdasarkan bentuk dan wujudnya terdiri bahan bakar padat, cair, dan gas.

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar berbentuk padat dan kebanyakan menjadi sumber energi panas. Energi panas yang dihasilkan untuk memanaskan air menjadi uap berfungsi dalam menggerakkan peralatan dan menyediakan energi, misalnya kayu dan batubara. Bahan bakar cair adalah bahan

bakar yang strukturnya tidak rapat, jika dibandingkan dengan bahan bakar padat. Contoh dari bahan bakar cair yaitu gasoline, bensin, minyak tanah, dan solar. Sedangkan bahan bakar gas memiliki dua jenis, yakni *Compressed Natural Gas* (CNG) yang terdiri dari metana dan *Liquid Petroleum Gas* (LPG). Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja prototipe pembangkit uap yang dirancang adalah LPG (*Liquified Petroleum Gas*).

2.5.1 LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

LPG (*liquefied petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propane (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). LPG juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_4) dan pentane (C_5H_{12}). Sifat LPG terutama adalah sebagai berikut:

- a. Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar.
- b. Gas tidak beracun, tidak berwarna, dan biasanya berbau menyengat.
- c. Gas dikirimkan sebagai cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
- d. Cairan dapat menguap jika dilepaskan dan menyebar dengan cepat.
- e. Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

LPG terdiri dari campuran utama yang mempunyai komposisi 50% propane (C_3H_8) dan 50% butana (C_4H_{10}) hal ini berdasarkan volume atau mol. Sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (propilen dan butilen) dan beberapa fraksi C2 yang lebih ringan dan C5 yang lebih berat. Senyawa yang terdapat dalam LPG adalah propan (C_3H_8), propilen (C_3H_6), normal dan iso-butan (C_4H_{10}), dan butilen (C_4H_8), serta etil mercaptane sebagai zat pembau.

Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas namun dapat diembunkan menjadi bentuk cair pada suhu normal dengan tekanan yang cukup besar. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Adapun spesifikasi LPG dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi LPG

Description	Mi	Ma
<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>	-	ASTM No.1
Total Sulphur, <i>grains/100 cuft</i>	-	
<i>Water content</i>	<i>Free of water</i>	<i>Free of water</i>
Komposisi :		D-2163 Test
C2 % vol	-	0.2
C5 + (C5 and heavier) % vol	97.5	-
<i>Ethyl or Buthyl mercaptan added ml/100</i>		50

Sumber : Pertamina,2016

2.6 Prinsip Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi jika ada oksigen yang cukup karena oksigen merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah menjadi 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 elemen lain. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran.

2.7 Reaksi Pembakaran

Hasil utama pembakaran adalah CO₂ dan disertai energi panas. Selain itu, pembakaran juga menghasilkan CO, sulfur, abu, dan NOX atau sulfur tergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan.

Reaksi pembakaran:





Pada pembakaran stokiometri, ketika karbon terbakar dengan oksigen maka reaksi utama akan menghasilkan karbondioksida, air, nitrogen, dan beberapa gas lainnya (kecuali oksigen).

2.8 Rasio Udara dan Udara Berlebih

Pada suatu reaksi pembakaran berlangsung dapat diketahui dari angka perbandingan antara jumlah udara aktual dengan jumlah udara teoritisnya atau melihat seberapa besar kelebihan udara aktual dari kebutuhan udara teoritisnya, hal ini bertujuan untuk menilai efisiensi dari suatu proses pembakaran. Untuk mengetahui jumlah udara aktual harus diketahui kandungan O atau CO₂ dalam gas buang (% volume, basis kering) melalui pengukuran. Sedangkan udara teoritis tergantung bahan bakar yang digunakan. Rasio udara dan udara berlebih dapat diketahui sebagai berikut:

$$\text{Rasio Udara} = \frac{\text{Jumlah Udara Pembakaran Aktual}}{\text{Jumlah Udara Pembakaran Teoritis}} = \frac{21}{21 - \%O_2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\% \text{ Excess Air} = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} \times 100 \% \dots\dots\dots(11)$$

Jumlah udara actual tergantung pada beberapa faktor antara lain:

- Jenis bahan bakar dan komposisinya,
- Desain ruang bakar (*furnace*),
- Kapasitas pembakaran (*firing rate*) optimum 70 – 90%,
- Desain dan pengaturan *burner*.

2.8.1 Rasio Udara Bahan Bakar

Perbandingan jumlah udara dengan bahan bakar disebut dengan *Air Fuel Ratio* (AFR). Perbandingan ini dapat dibandingkan baik dalam jumlah massa ataupun dalam jumlah volume.

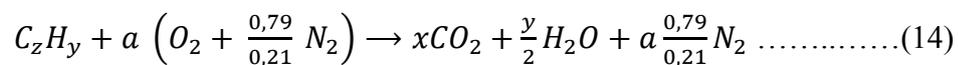
$$\text{AFR} = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{V_{fuel}}{V_{air}} \dots\dots\dots(12)$$

Besarnya AFR dapat diketahui dari uji coba reaksi pembakaran yang benar-benar terjadi, nilai ini disebut AFR aktual. Sedangkan AFR lainnya adalah

AFR stoikiometri, merupakan AFR yang diperoleh dari persamaan reaksi pembakaran. Dari perbandingan nilai AFR tersebut dapat diketahui nilai rasio ekuivalen (ϕ):

$$\phi = \frac{AFR_{sto}}{AFR_{akt}} \dots\dots\dots(13)$$

Untuk dapat mengetahui nilai AFR, maka harus dihitung jumlah keseimbangan atom C,H, dan O dalam suatu reaksi pembakaran. Adapun rumus umum reaksi pembakaran yang menggunakan udara kering adalah:



2.9 Nilai Kalor Bahan Bakar

Reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen dari udara menghasilkan panas. Besarnya panas yang timbulkan jika satu satuan bahan bakar dibakar sempurna disebut nilai kalor bahan bakar (*Calorific Value*). Berdasarkan asumsi ikut tidaknya panas laten pengembunan uap air dihitung sebagai bagian dari nilai kalor suatu bahan bakar, maka nilai kalor bahan bakar dapat dibedakan menjadi nilai kalor atas dan nilai kalor bawah.

Nilai kalor atas (*High Heating Value*) merupakan nilai kalor yang diperoleh secara eksperimen dengan menggunakan calorimeter dimana hasil pembakaran bahan bakar didinginkan sampai suhu kamar sehingga sebagian besar uap air yang terbentuk dari pembakaran hydrogen mengembun dan melepaskan panas latennya. Secara teoritis, besarnya nilai kalor atas (HHV) dapat dihitung bila diketahui komposisi bahan bakar dengan menggunakan persamaan *Dulong*:

$$HHV = 33950 + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \dots\dots\dots(15)$$

Dimana:

HHV = Nilai kalor atas (kJ/kg)

C = Persentase karbon dalam bahan bakar

H₂ = Persentase hidrogen dalam bahan bakar

O₂ = Persentase oksigen dalam bahan bakar

S = Persentase sulfur dalam bahan bakar

Nilai kalor bawah (*Low Heating Value*) merupakan nilai kalor bahan bakar tanpa panas laten yang berasal dari pengembunan uap air. Umumnya kandungan hidrogen dalam bahan bakar cair berkisar 15% yang berarti setiap satu satuan bahan bakar dan 0,15 bagian merupakan hidrogen. Pada proses pembakaran sempurna, air yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar adalah setengah dari jumlah mol hidrogennya.

Selain berasal dari pembakaran hidrogen, uap air yang terbentuk pada proses pembakaran dapat pula berasal dari kandungan air yang memang sudah ada didalam bahan bakar (*moisture*). Panas laten pengkondensasian uap air pada tekanan parsial 20 kN/m² (tekanan yang umum timbul pada gas buang) adalah sebesar 2400 kJ/kg, sehingga besarnya nilai kalor bawah (LHV) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9 \text{H}_2) \dots\dots\dots(16)$$

Dimana:

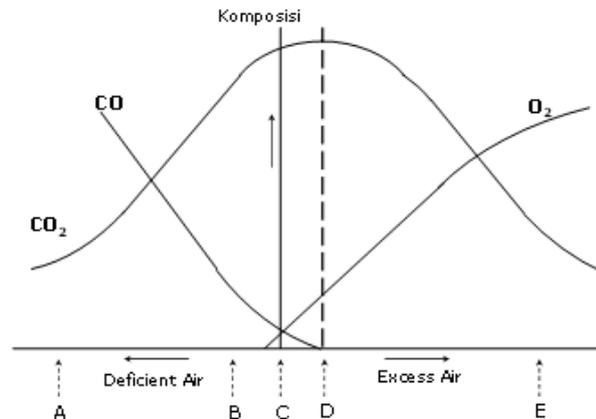
LHV = Nilai kalor bawah (kJ/kg)

M = Persentase kandungan air dalam bahan bakar (*moisture*)

Dalam perhitungan efisiensi panas dari mesin bakar, dapat menggunakan nilai kalor bawah (LHV) dengan asumsi pada suhu tinggi saat gas buang meninggalkan mesin tidak terjadi pengembunan uap air. Namun dapat juga menggunakan nilai kalor atas (HHV) karena nilai tersebut umumnya lebih cepat tersedia. Peraturan pengujian berdasarkan ASME (*American of Mechanical Engineers*) menentukan penggunaan nilai kalor atas (HV), sedangkan peraturan SAE (*Society of Automotive Engineers*) menentukan penggunaan nilai kalor bawah (LHV).

2.10 Profil Pembakaran

Mengetahui komposisi gas buang melalui pengukuran berguna untuk dapat mengerti dengan baik proses pembakaran yang terjadi dalam suatu *boiler* atau *furnace*.



Gambar 6. Profil Pembakaran Bahan Bakar

Pada gambar profil pembakaran bahan bakar hubungan antara udara berlebih dengan gas-gas hasil pembakaran dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada laju udara dibawah kebutuhan teoritisnya (titik A), semua karbon dalam bahan bakar tidak semuanya diubah menjadi CO_2 , tetapi lebih banyak CO yang dihasilkan.
2. Dengan menambah udara (titik B), sebagian CO diubah menjadi CO_2 dengan melepas lebih banyak panas. Komposisi CO dalam gas buang turun tajam dan CO_2 meningkat.
3. Pada titik dimana udara stoikiometrik terpenuhi (titik C), semua karbon dapat seluruhnya diubah menjadi CO_2 pada system ideal. Kondisi ini tidak pernah dapat dicapai.
4. Operasi pembakaran normal (titik D) pada prakteknya dapat dicapai dengan menambah sedikit udara diatas kebutuhan stoikiometrinya (*excess air*) untuk mencapai pembakaran lengkap. Pada kondisi ini, CO_2 pada level maksimumnya, dan produksi CO pada level minimumnya dalam gas buang. Pembakaran paling efisien.
5. Semakin banyak udara ditambahkan (titik E), level CO_2 kembali turun karena bercampur dengan udara lebih. Udara lebih yang tinggi juga merugikan karena menurunkan temperature pembakaran dan menyerao panas berguna dalam gas buang.

2.11 Burner

Sumber energi kalor atau panas diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran pada mesin tenaga uap terjadi pada *furnace*. Pada *furnace* terdapat *burner*. *Furnace* ditempatkan menyatu dengan *boiler* dan terpisah dengan fluida kerja air yang mengalir pada pipa-pipa *boiler*. Berdasarkan dari jenis bahan bakar yang digunakan, *burner* diklasifikasikan menjadi tiga yaitu:

1. *Burner* untuk bahan bakar cair
2. *Burner* untuk bahan bakar gas
3. *Burner* untuk bahan bakar padat

Berbagai macam teknologi telah dikembangkan untuk menaikkan efisiensi dari proses pembakaran. Efisiensi proses pembakaran yang tinggi akan menaikkan efisiensi total dari *furnace* dan jumlah panas yang ditransfer ke *boiler* menjadi semakin besar. *Furnace* harus mudah dikendalikan untuk merespon jumlah uap dengan temperatur dan tekanan tertentu.

2.11.1 Burner Dengan Bahan Bakar Cair

Di dalam permbakaran dari bahan bakar cair, diperlukan suatu proses penguapan atau proses atomisasi bahan bakar. Hal ini diperhatikan untuk mendapatkan percampuran yang baik dengan udara pembakaran. Minyak bakar distilat bisa terbakar dengan api yang biru jika secara sempurna bahan bakar ini diuapkan dan tercampur merata (*homogenous*) dengan udara sebelum terbakar. *Burner* yang digunakan untuk membakar bahan bakar dalam bentuk uap atau bentuk atom-atom (*spray-droplet*) sebelum terbakar berbeda konstruksi dasarnya, yaitu *vaporizing burner*, *twin fluid atomizing burner*, dan *pressure jet burner*

a. *Vaporizing Burner*

Burner jenis ini menggunakan panas dari api untuk menguapkan bahan bakar secara terus menerus. Bahan bakar diuapkan terlebih dahulu sebelum bercampur dengan udara. Prinsip penguapan ini dipakai pada kompor lidah api (*blow torch*), kompor tipe pot, lampu minyak tanah dan lain-lain.

b. *Twin Fluid Atomizing Burner*

Proses pengkabutan dari burner model ini dibantu dengan fluida bertekanan, dimana pada waktu proses pengkabutan fluida mempunyai energy kinetic tinggi ke luar dari nosel. Fluida yang sering dipakai adalah udara atau uap bertekanan. Bahan bakar disemprotkan dengan tekanan tinggi, uap dengan tekanan sedang akan membantu proses pemecahan bahan bakar menjadi droplet, sehingga pengkabutan lebih bagus.

c. *Pressure Jet Burner*

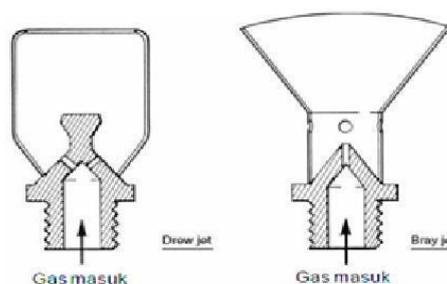
Bahan bakar cair bertekanan tinggi dimasukan melalui lubang-lubang dengan posisi tangensial terhadap sumbu nosel, sehingga menghasilkan aliran radial. Di dalam nosel terjadi aliran *swirl* sehingga diharapkan terjadi atomisasi dengan sempurna, setelah ke luar nosel bahan bakar cair menjadi *droplet-droplet* yang lebih mudah bercampur dengan udara.

2.11.2 Burner dengan Bahan Bakar Gas

Proses pembakaran bahan bakar gas tidak memerlukan proses pengkabutan atau atomisasi, bahan bakar langsung berdifusi dengan udara. Ada dua tipe burner dengan bahan bakar gas, yaitu:

1. *Non Aerated Burner*

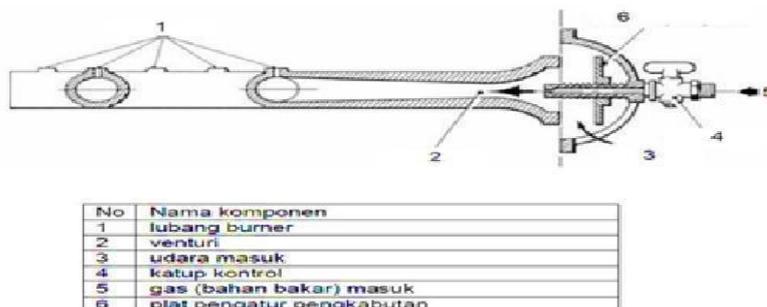
Tipe ini bahan bakar gas dan udara tidak dicampur dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Bahan bakar gas bertekanan melalui *nozzle*, udara akan berdifusi secara alamiah dengan bahan bakar. Proses pembakaran tipe ini dinamakan difusi.



Gambar 7. *Non Aerated Burner*

2. Aerated Burner

Pada *aerated burner*, bahan bakar gas dan udara dicampur dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Udara sekunder dibutuhkan untuk menyempurnakan pembakaran. Penggunaan udara sekunder ini tergantung dari cara udara primer dimasukkan ke dalam *furnace*.



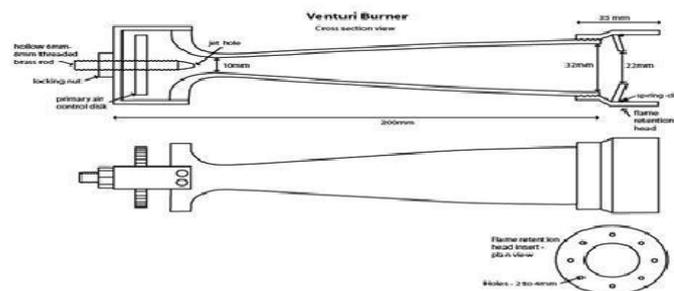
Gambar 8. *Aerated Burner*

Sumber: Atsariam, 2011

Pada burner tipe ini selalu ada pengaman untuk mencegah nyala balik ke sumber campuran bahan bakar udara. Aerated burner dibagi menjadi 2 jenis:

a. *Atmospheric or Natural Draft Burners (Bunsen Burners)*

Alat ini menggunakan efek mekanis yaitu prinsip *venturi*, sehingga *atmospheric burner* disebut *venturi burner gas*. Pada kasus *burner gas venturi*, gas keluar dari jet di depan penyempitan dari pipa *burner*. Gas sudah bertekanan dan penyempitan semakin mempercepat sehingga menghasilkan vakum parsial dibelakang jet yang menyerap udara ke pipa *burner*. Campuran bahan bakar dan udara yang ditingkatkan menyebabkan *venturi burner* menjadi lebih efektif dan bisa menghasilkan tipe api yang bervariasi dari oksidasi sampai reduksi. Juga bentuk dari pipa *burner* setelah penyempitan memperlambat kecepatan gas, menyebabkan udara dan gas lebih bercampur menyeluruh sebelum menemui *flame retention head*. Keunggulan *flame retention head* pada akhir pipa burner didesain untuk memastikan bahwa api tidak membakar pipa dari *head burner* yang merupakan masalah pada desain burner sederhana.



Gambar 9. *Venturi burner gas*

Sumber: Atsariam, 2011

b. *Forced Draft Burners*

Pada *forced Draft Burner* sejumlah gas yang dibutuhkan untuk menyuplai panas keluaran dicampur dengan udara bertekanan untuk pembakaran sempurna. Udara yang dialirkan memiliki tekanan 2 in H₂O. Kebutuhan udara disuplai oleh *electric fan* atau blower. Tidak dibutuhkan udara sekunder. Semua kebutuhan udara untuk pembakaran disuplai oleh udara primer.

2.11.3 *Burner untuk bahan padat*

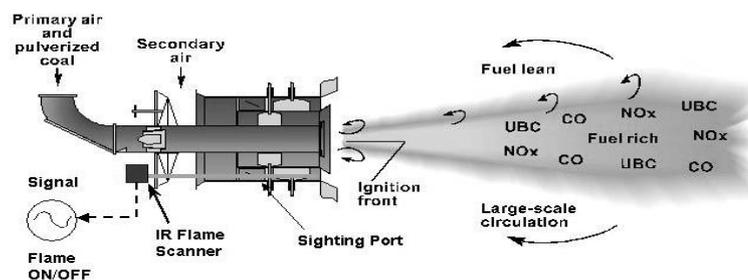
Bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang sangat berlimpah di alam. Bahan bakar ini harus melalui proses yang lebih rumit daripada jenis bahan bakar lainnya untuk terbakar. Bahan bakar padat mengandung air, zat terbang, arang karbon dan abu. Air dan gas terbang yang mudah terbakar harus diuapkan dulu melalui proses pemanasan sebelum arang karbon terbakar.

Bahan bakar padat banyak dipakai sebagai sumber energi pada mesin tenaga uap. Bahan bakar tersebut dibakar di *furnace* dengan *stoker* atau *burner*. Ada beberapa tipe *burner* atau *stoker* yang dipasang di *furnace* sebagai berikut:

a. *Pulverized fuel burner*

Bahan bakar padat akan dihancurkan lebih dahulu dengan alat *pulverized* sampai ukuran tertentu sebelum dicampur dengan udara. Selanjutnya campuran serbuk batu bara dan udara diberi tekanan kemudian disemprotkan menggunakan *diffuser*. Proses pembakaran dibantu dengan

penyalan dengan bahan bakar gas atau cair untuk menguapkan air dan zat terbang. Udara tambahan diperlukan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien

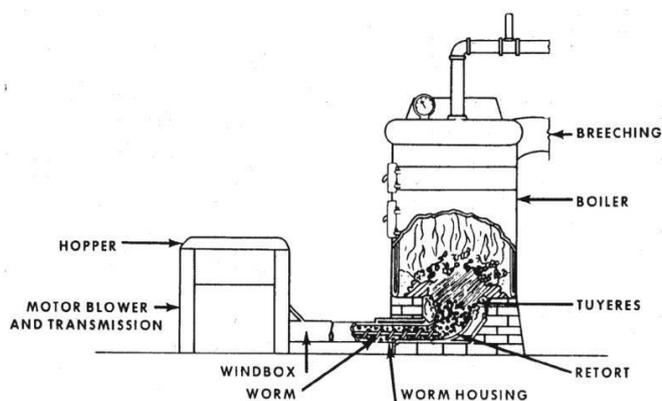


Gambar 10. *Pulverized fuel burner*

Sumber: *Pulverized coal burner air staging reduces*
https://www.researchgate.net/figure/227992885_fig1_Figure-1-Schematic-of-a-wall-fired-low-NOx-pulverized-coal-burner-Air-staging-reduces

b. *Underfeed stoker*

Stoker jenis ini banyak dipakai untuk industri skala kecil, konstruksinya sederhana. Bahan bakar di dalam berupa batu bara dimasukan ke perapian dengan *screw* pengumpan. Proses pembakaran terjadi di dalam *retort*, batu bara akan dipanaskan untuk menguapkan air dan zat terbang kemudian arang terbakar. Sisa pembakaran berupa abu akan digeser ke luar karena desakan batu bara baru yang belum terbakar. Udara tambahan digunakan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien.

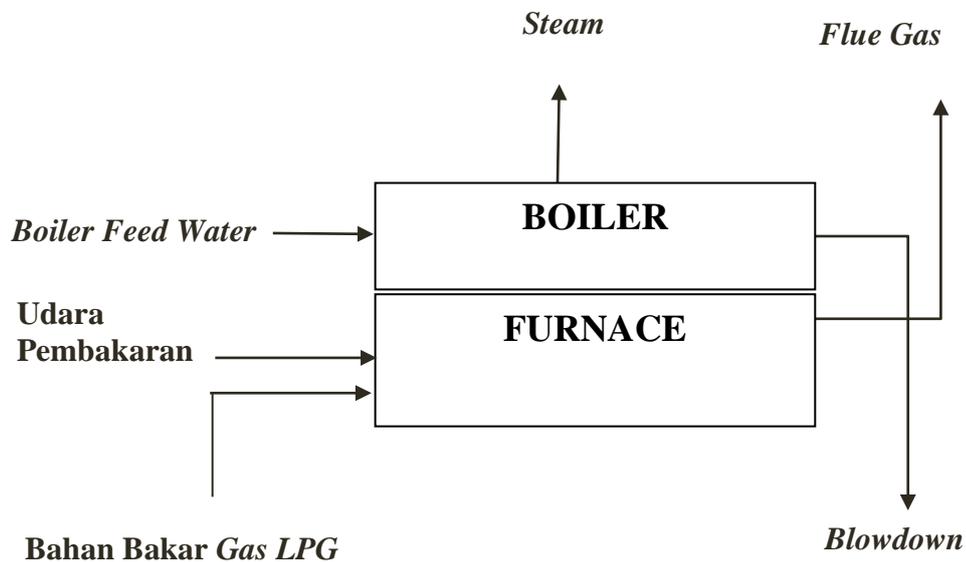


Gambar 11. *Underfeed stoker*

Sumber: https://www.cdc.gov/nceh/publications/books/housing/figure_cha12.htm

2.12 Diagram Alir Proses pada Water Tube Boiler

Pembangkit uap *water tube boiler* secara fungsional dan struk tural terdiri dari dua unit sub sistem yakni bagian pemanas disebut *furnace* dan bagian pembangkit uap disebut *boiler*. Jadi sistem keseluruhan dapat disebut sebagai *boiler furnace*. *Furnace* merupakan ruang bakar yang terdiri dari *burner* yang berfungsi untuk menghasilkan energi panas. Energi panas tersebut selanjutnya di *transfer* melalui dinding *tube* untuk memanaskan air sehingga diperoleh *steam*. Analisi aliran massa dan energi pada kondisi *steady state* di asumsikan kepada hukum konserfasi massa dan konserfasi energi.



Gambar 12. Aliran massa dan energi

2.12.1 Aliran massa secara menyeluruh

Secara keseluruhan jumlah aliran massa yang masuk sama dengan jumlah aliran massa keluar. Jadi, hukum konserfasi massa dalam sistem dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \dots\dots\dots(17)$$

Dimana :

$$\sum m_{in} = m_{LPG} + m_{BFW} + m_{udara} \dots\dots\dots(18)$$

$$Q = m_{flue\ gas} + m_{steam} + m_{blowdown} \dots\dots\dots(19)$$

$$\sum m_{out} = m_{steam} + m_{blowdown} + m_{fluegas} \dots\dots\dots(20)$$

2.12.2 Aliran energi secara menyeluruh

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} \dots\dots\dots(21)$$

Sistem aliran energi secara menyeluruh pada *boiler furnace* adalah

1. Input

a. *heating value* bahan bakar

$$Q = m \times Hv \dots\dots\dots(22)$$

m = massa bahan bakar

Hv = *heating value* bahan bakar (btu/lb)

b. Sensible entalpi bahan bakar panas

$$Q = n \times Cp \times (T - T_0) \dots\dots\dots(23)$$

n = mol bahan bakar

Cp = *heat capacity* dalam bahan bakar

c. *sensible* entalpi udara

$$Q = n \times Cp \times (T - T_0) \dots\dots\dots (24)$$

n = mol dalam udara

Cp = *heat capacity* dalam udara

d. Entalpi *moisture* udara

$$Q = m \times Hv + m \times hfg \dots\dots\dots (25)$$

m = massa H₂O dalam udara

Hv = entalpi *saturated* liquid H₂O udara

Hfg = *laten heat* H₂O dalam udara

e. Entalpi *boiler feed water* (BFW)

$$Q = m \times hf \dots\dots\dots(26)$$

m = massa *boiler feed water* (BFW)

hf = *saturated liquid water* (Btu/lb)

2. Output

a. Sensible Entalpi *flue gas*

$$Q = m \times Cp \times (T - T_0) \dots\dots\dots (27)$$

T = temperatur *flue gas* (°C)

T_o = temperature *refrent* ($^{\circ}\text{C}$)

C_p = rata-rata komponen gas

b. *Laten heat mouisture flue gas*

$$Q = m \times hfg \dots\dots\dots(28)$$

Hfg = *laten heat* (btu/lb)

M = H_2O dalam *flue gas*

c. *Heating value (CO) dalam flue gas*

$$Q = m \times Hv \dots\dots\dots(29)$$

d. *Entalpi saturated steam*

$$Q = m \times hg \dots\dots\dots(30)$$

Hg = entalpi *steam*

e. *Heat loss radiasi*

$$Q_r = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{\infty}^4) \dots\dots\dots(31)$$

Dimana :

A = luas permukaan (m^2)

σ = konstanta Stefan Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$)

ε = emisivitas bahan $\varepsilon = 0,78$ (*oxidized surface*)

T_s = temperatur permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} = temperatur lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

f. *Heat loss konveksi*

$$Q_c = h \times A \times (T - T_o) \dots\dots\dots(32)$$

$$h = \frac{k \text{ Num}}{D} \dots\dots\dots(33)$$

g. *Heat loss blowdown*

$$Q = m \times hf \dots\dots\dots(34)$$

h. *Panas yang tidak terdeteksi*

$$Q = Q_{input} - Q_{output} \dots\dots\dots(35)$$