

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Pada ketel pipa air seperti tampak pada Gambar 2.1 air umpan *boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Untuk ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel pipa air sebagai berikut :

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



Gambar 2.1. Ketel Pipa Air
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kerja ketel uap (*boiler*) adalah sebagai berikut :

- Faktor laju udara bersih yang disuplai melewati *air heater*.

Boiler harus dioperasikan dengan laju aliran udara lebih dari kebutuhan udara teoritis yang dihitung berdasarkan analisa gas asap. Tetapi udara berlebih yang terlalu banyak juga akan mengakibatkan terjadinya *losses* karena pengambilan panas sendiri oleh udara berlebih untuk dibawa bersama gas buang, untuk itulah dilakukan analisa gas asap untuk menentukan kebutuhan udara aktual.

- Temperatur udara pembakaran juga merupakan faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler*, temperatur udara pembakaran dapat dinaikkan dengan memanfaatkan temperatur gas buang (*flue gas*) yang tinggi dengan menggunakan alat pemanas udara (*air heater*).
- *Fouling* merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kerja *boiler*. *Fouling* adalah terjadinya deposit atau kerak pada permukaan perpindahan panas yang dapat menghambat perpindahan panas yang terjadi pada *boiler*. Sehingga efisiensi *boiler*-nya akan menurun dan temperatur gas buangnya akan semakin tinggi.
- Faktor *burner*, fungsi dari *burner* ini adalah untuk mencampur bahan bakar dan udara dengan proporsi yang sesuai untuk terjadinya penyalaan api dan untuk menjaga kondisi pembakaran yang terus menerus berjalan dengan baik. *Burner* yang tidak diatur dengan baik akan mengakibatkan pencampuran bahan bakar dengan udara tidak sesuai dan pada setiap laju pembebanan akan meningkatkan kebutuhan udara berlebih dan memboroskan pemakaian bahan bakar sehingga efisiensi *boiler* akan turun.

- *Blowdown* juga berpengaruh terhadap efisiensi *boiler*. Endapan yang terjadi di dinding *tube* pada sisi air dapat mengurangi efisiensi *boiler* dan bahkan kerak dapat merusak *tube* karena *over heating*. Endapan-endapan tersebut disebabkan oleh tingginya konsentrasi *suspended solids* dan *dissolved solids*. Oleh karena itu konsentrasi solids harus tetap dijaga pada kondisi tertentu. Proses *blowdown* adalah dimana air dibuang keluar dan segera digantikan oleh air umpan *boiler*. Pada proses *blowdown* ini air yang dikeluarkan dalam keadaan temperatur tinggi, maka hal ini merupakan pembuangan panas yang mengakibatkan penurunan efisiensi.

2.2. Komponen-Komponen *Boiler* (Main Equipment)

Boiler terdiri dari beberapa ruangan yang memiliki fungsi yang berbeda-beda, yaitu :

1. Ruang Bakar (*Furnace*)

Ruang bakar adalah bagian dari *boiler* yang berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar dan udara.

Tekanan gas panas yang berada di dalam ruang bakar (*furnace*) dapat lebih besar dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar positif) dan dapat juga bertekanan lebih kecil daripada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar negatif) atau bertekanan seimbang (*balance draft*).

Temperatur ruang bakar pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar dapat mencapai 674°C .



Gambar 2.2. Ruang Bakar
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

2. *Burner* (Alat Pembakaran)

Burner adalah alat yang dipakai untuk menyemburkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dan menghasilkan pengabutan yang memudahkan reaksi pembakaran.



Gambar 2.3. *Burner* Dalam Kondisi Perbaikan
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

3. Superheater

Superheater adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut sesuai dengan kebutuhan untuk menggerakkan *turbine*. Karena uap yang terbentuk dari pemanasan didalam pipa-pipa di ruang bakar berada dalam wujud jenuh atau basah maka uap yang demikian jika digunakan atau diekspansi dalam *turbine*, akan menimbulkan pengembunan yang cepat. *Superheater* dibedakan atas 2 jenis yaitu:

1. *Low Temperature Superheater* (LTS)

Uap jenuh dari *steam drum* dialirkan ke *Primary Superheater* atau *Low Temperature Superheater*. *Low Temperature Superheater* (LTS) menghasilkan uap dengan temperatur 568°C. Uap yang keluar dari LTS kemudian dialirkan ke *High Temperature Superheater* untuk dipanaskan kembali menjadi uap panas lanjut sehingga menghasilkan uap dengan temperature 607°C. Uap dari LTS juga digunakan untuk *steam atomizing* yang membantu proses pengabutan bahan bakar agar bahan bakar dapat terbakar sempurna.

Besar energi panas yang diserap oleh *Low Temperature Superheater* (LTS) untuk mengubah air menjadi uap dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini :

$$Q_{LTS} = W_s \times (H_{out} - H_{in}) \text{ kJ/jam} \quad (2-1)$$

Dimana :

Q_{LTS} : panas yang diserap oleh *low temperature superheater* (kJ/jam)

W_s : kapasitas aliran uap (kg/jam)

H_{in} : entalpi keluar LTS (kJ/kg)

H_{out} : entalpi masuk LTS (kJ/kg)



Gambar 2.4. Kondisi Ruang LTS Dilihat Dari Main Hole
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

2. High Temperature Superheater

Uap hasil pemanasan LTS selanjutnya mengalir ke *High Temperature Superheater* (HTS) yang terletak pada bagian gas sangat panas. Sebagian dari HTS terletak tepat diatas ruang bakar, oleh karena itu transfer panas yang diperoleh oleh HTS adalah secara radiasi dan konveksi. Kemudian uap panas yang diperoleh dari HTS mengalir ke turbin.

Besar panas yang diserap oleh *High Temperature Superheater* untuk menghasilkan uap dengan temperatur 607°C dengan tekanan -325 Pa yang akan dialirkan ke turbin dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Q_{HTS} = W_s \times (H_{out} - H_{in}) \text{ kJ/jam} \quad (2-2)$$

Dimana :

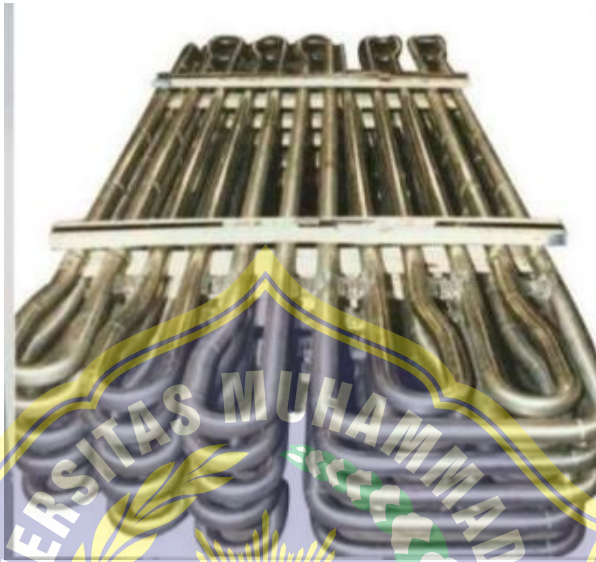
Q_{HTS} : panas yang diserap oleh HTS (kJ/jam)

W_s : kapasitas aliran uap (kg/jam)

H_{out} : entalpi keluar HTS kJ/kg

H_{in} : entalpi masuk HTS kJ/kg

Q_{HTS} : panas yang diserap oleh HTS (kJ/jam)



Gambar 2.5. *Boiler Tubing High Temperature Superheater*
(Sumber : <https://www.slideshare.net/korneliapakiding>)

3. *Economizer*

Economizer merupakan salah satu peralatan yang meningkatkan efisiensi *boiler* karena memanfaatkan kalor yang terkandung dalam *flue gas* sebelum terbuang ke atmosfer melalui *stack*. Dengan kata lain dengan adanya *economizer* maka unit PLTU telah menghemat konsumsi bahan bakar. *Economizer* terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap sebelum meninggalkan *boiler*. Transfer panas yang terjadi pada *economizer* adalah secara konveksi. Artinya *flue gas* memberikan panas pada pipa-pipa *economizer* sehingga temperatur air yang ada di dalam pipa-pipa naik dari 369°C sampai 436°C. Pipa-pipa *economizer* terbuat dari bahan baja yang sanggup menahan panas dan tekanan tinggi. Pada pipa-pipa *economizer* sering sekali terjadi kerusakan.

Besar panas yang diserap oleh *economizer* ini dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q_{eco} = W_s \times C_{p_{air}} (T_{out} - T_{in}) \text{ kJ/jam} \quad (2-3-)$$

Dimana :

Q_{eco} : panas yang diserap oleh *economizer* (kJ/jam)

W_s : kapasitas aliran uap (kg/jam)

$C_{p_{air}}$: panas jenis air kJ/Kg

T_{out} : temperatur keluar *economizer* °C

T_{in} : temperatur masuk *economizer* °C



Gambar 2.6. *Economizer*
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

4. *Boiler Drum*

Boiler drum adalah bejana tempat menampung air yang datang dari *economizer* dan uap hasil penguapan dari *tubewall*. Kira-kira setengah dari *drum* berisi air dan setengahnya lagi berisi uap. *Boiler drum* terbuat dari plat baja dilas dan dilengkapi *Man hole*, Saluran menuju *superheater*, Saluran menuju *feedwater inlet*, Saluran menuju *blowdown*, Saluran menuju *downcomer*,

Saluran menuju *safety valve*, Pipa injeksi bahan kimia , Pipa *sample taking*, Pipa menuju alat ukur dan *control*.

Uap yang dihasilkan dari dalam *tube wall* terkumpul di dalam *boiler drum*. Uap akan mengalir ke arah puncak *boiler drum* melewati *steam separator* dan *screen dryer* lalu keluar dari dalam *drum* menuju *superheater* dan akhirnya ke *turbine*. Sedangkan butir-butir air yang jatuh akan bersirkulasi kembali bersama air yang baru masuk.



Gambar 2.7 *Boiler Drum*
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

5. *Stack* (Cerobong)

Stack merupakan cerobong asap yang berfungsi sebagai laluan *flue gas* terbang ke atmosfer. Temperatur *flue gas* sebelum terbang ke atmosfer dijaga tidak melebihi 170°C, agar tidak terjadi kerusakan lingkungan atau merusak lapisan ozon.



Gambar 2.8. *Stack*
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

Auxiliary equipment

1. *Forced Drought Fan (FDF)*

Berfungsi untuk mengambil udara dari atmosfer dengan suhu sekitar 30°C dan tekanan 1 atm. Untuk kebutuhan *fuel oil burner*, setiap FDF mampu melayani 60% dari keperluan beban.



Gambar 2.9. *Forced Drought Fan (FDF)*
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

2. *Air Preheater* (Pemanas Awal Udara)

Air preheater merupakan alat pemanas awal udara pembakaran. Dimana udara yang dihisap oleh FDF dengan temperatur sekitar 30°C mengalir melalui *air preheater* dan dihasilkan temperatur udara sekitar 178°C . Media yang digunakan untuk memanaskan udara melalui *air preheater* adalah *steam* yang diperoleh dari *auxillary steam header* dengan temperatur *steam* 180°C .



Gambar 2.10. *Air Preheater* (Pemanas Awal Udara)
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

3. *Air Heater* (Pemanas Udara)

Air heater merupakan salah satu alat yang meningkatkan efisiensi ketel. Karena memanfaatkan kalor yang terkandung pada gas buang hasil pembakaran untuk memanaskan udara. Udara yang telah mengalami proses pemanasan di *air preheater* selanjutnya dialirkan melewati *air heater* untuk dipanaskan kembali. Proses *transfer* panas yang terjadi di *air heater* adalah secara konveksi. Temperatur udara setelah dipanaskan di *air heater* diharapkan 368°C agar memudahkan proses pembakaran.

Temperatur *flue gas* melewati *air heater* cukup tinggi sekitar 436°C maka elemen-elemen *air heater* harus tahan panas. Temperatur *flue gas* setelah *air heater* dijaga di atas 368°C, tujuannya adalah untuk mencegah pengendapan sulfur pada sisi dingin *air heater*. Karena sulfur dapat menyebabkan korosi pada elemen-elemen *air heater*. Namun temperatur *flue gas* keluar *air heater* juga dijaga di bawah 170°C, tujuannya adalah agar tidak merusak lingkungan atau dengan kata lain merusak lapisan ozon.

Besar panas yang diserap oleh *Air heater* ini dari *flue gas* untuk memanaskan udara pembakaran dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{AH} = (W_a)_{akt} \times C_{p_{udara}} (T_{out} - T_{in}) \text{ kJ/jam} \quad (2-4)$$

Dimana :

Q_{AH} : panas yang diserap oleh *air heater* (kJ/jam)

$(W_a)_{akt}$: berat udara sebenarnya (kg/jam)

$C_{p_{udara}}$: panas jenis udara (kJ/Kg)

T_{out} : temperatur udara keluar *air heater* (°C)

T_{in} : temperatur udara masuk *air heater* (°C)



Gambar 2.11. *Air heater* (Pemanas Udara)
(Sumber : PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar)

2.3. Jenis-Jenis Perpindahan Panas

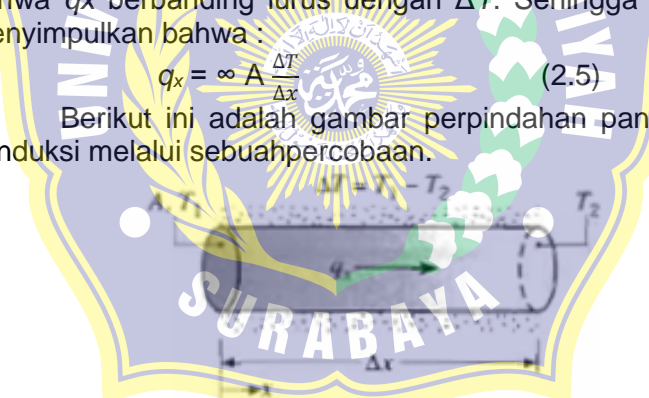
2.3.1. Konduksi

Sebuah batang silinder dengan material tertentu diisolasi pada sisi terluarnya dan pada kedua ujung permukaannya memiliki suhu yang berbeda yakni $T_1 > T_2$. Perbedaan temperatur tersebut menyebabkan perpindahan panas secara konduksi pada arah x positif. Dapat diukur laju perpindahan panas q_x , dan kita dapat menentukan q_x bergantung pada variabel-variabel berikut: ΔT , yakni perbedaan temperatur; Δx , yakni panjang batang; dan A , yakni luas penampang tegak lurus bidang.

Jika ΔT dan Δx adalah konstan dan hanya memvariasikan A , maka kita dapat melihat bahwa q berbanding lurus dengan A . Dengan cara yang sama, jika ΔT dan A adalah konstan, kita dapat melihat bahwa q_x berbanding terbalik dengan Δx . Apabila A dan Δx konstan, maka kita dapat melihat bahwa q_x berbanding lurus dengan ΔT . Sehingga kita dapat menyimpulkan bahwa :

$$q_x = \infty A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Berikut ini adalah gambar perpindahan panas secara konduksi melalui sebuah percobaan.



Gambar 2.12. Perpindahan Panas Secara Konduksi
(Sumber : Frank P. Incropera :1996)

Dengan memperhatikan material batang, sebagai contoh plastik, kita akan menemukan bahwa kesebandingan diatas adalah valid. Namun, kita juga menemukan bahwa untuk nilai A , Δx , dan ΔT yang sama, akan menghasilkan nilai q yang

lebih kecil untuk plastik daripada bermaterial logam. Sehingga kesebandingan diatas dapat ditulis dalam bentuk persamaan dengan memasukkan koefisien yang dipengaruhi oleh material. Sehingga diperoleh :

$$q_x = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-6)$$

k , adalah konduktivitas termal (W/m.K), yang adalah merupakan sifat material yang penting. Dengan menggunakan limit $\Delta x \rightarrow 0$ kita mendapatkan persamaan untuk laju perpindahan panas,

$$q_x = k A \frac{dT}{dx} \quad (2-7)$$

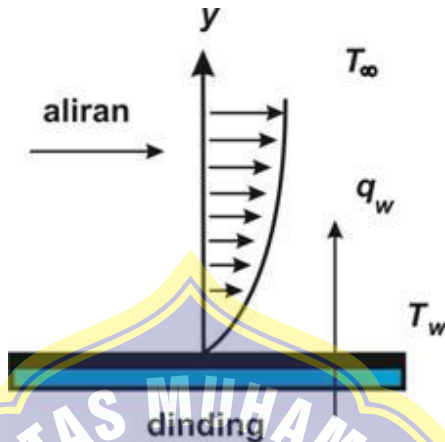
atau persamaan flux panas menjadi,

$$q'_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2-8)$$

2.3.2. Konveksi

Mekanisme perpindahan panas dapat berupa konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi dan konveksi adalah membutuhkan media perantara dalam proses perpindahan panasnya. Berbeda dengan konduksi, pada konveksi membutuhkan gerakan fluida untuk dapat memindahkan panas.

Penelitian menunjukkan bahwa perpindahan panas konveksi sangat bergantung pada sifat-sifat fluida seperti viskositas dinamis μ , konduktivitas termal k , massa jenis ρ , dan spesifik panas C , dan dipengaruhi oleh kecepatan fluida V . Konveksi juga bergantung pada bentuk dan kekasaran permukaan, dan bahkan juga dipengaruhi oleh tipe aliran seperti laminar atau turbulen. Oleh karena itu, konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang paling kompleks.



Gambar 2.13. Pendinginan Sebuah Balok Yang Panas Dengan Konveksi Paksa
(Sumber : Moran & Michael J, 2004:407)

Meskipun konveksi adalah kompleks, setelah diamati bahwa laju perpindahan panas secara konveksi berbanding lurus dengan perbedaan temperatur dan dapat ditulis dengan Hukum Newton tentang pendinginan.

$$q_{\text{konveksi}} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2-9)$$

h merupakan koefisien perpindahan panas konveksi, A merupakan area permukaan perpindahan panas, T_s merupakan temperatur permukaan benda, T_{∞} merupakan temperatur lingkungan sekitar benda.

2.3.3. Radiasi

Radiasi berbeda dengan mekanisme perpindahan panas secara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara radiasi tidak membutuhkan kehadiran suatu material sebagai media perpindahan panas.

Perpindahan panas secara konduksi dan konveksi terjadi dari temperatur yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Pada radiasi, perpindahan panas dapat terjadi pada 2 benda yang memiliki temperatur yang tinggi dan dipisahkan oleh benda yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Dengan menganggap permukaan benda yang kecil A , emisifitas e , dan kemampuan untuk menyerap a pada temperatur T yang terdiri dari keisotermalan yang besar dalam bentuk yang tertutup pada benda *blackbody*. *Blackbody* dapat didefinisikan sebagai pemancar dan penyerap radiasi yang sempurna. Pada temperatur dan panjang gelombang tertentu, tidak ada permukaan yang dapat memancarkan energi yang lebih banyak daripada *blackbody*. *Blackbody* menyerap semua radiasi tanpa memperhatikan panjang gelombang dan arahnya. *Blackbody* juga memancarkan energi radiasi yang merata dalam segala arah dalam setiap unit area searah dengan arahemisi, yang disebut sebagai pemancar *diffuse*. *Diffuse* dapat diartikan sebagai arah yang bebas untuk berdiri sendiri. Hal ini dapat kita lihat pada gambar berikut :



Gambar 2.14. *Black Body* Disebut Sebagai Pemancar Dengan Arah Yang Bebas

(Sumber : Cengel Yunus A. And Michael A. Boles : 1998).

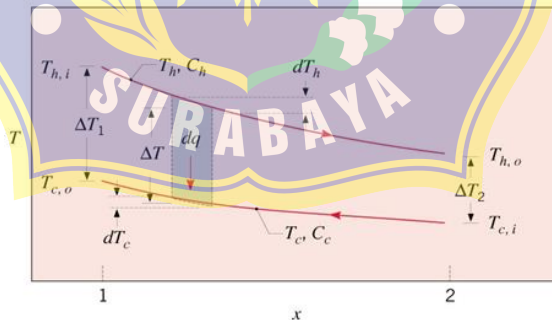
Energi radiasi yang dipancarkan oleh sebuah *black body* tiap satuan waktu dan tiap satuan luasan area ditetapkan secara eksperimental oleh Joseph Stefan pada tahun 1879 dan dapat dituliskan :

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2-10)$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ adalah konstanta Stefan-Boltzmann dan T adalah temperatur absolut dari suatu permukaan (K). Persamaan ini diverifikasi secara teori pada tahun 1884 oleh Ludwig Boltzmann. E merupakan kekuatan emisifitas *black body*.

2.4. Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Nilai LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*) adalah nilai yang berkaitan dengan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin penukar panas. Dengan asumsi bahwa aliran pendingin mengalir dalam kondisi tunak (*steady state*), tidak ada kehilangan panas secara keseluruhan, tidak ada perubahan fase pendingin. Gambar 2.15 menggambarkan perubahan suhu yang dapat terjadi pada salah satu atau kedua fluida dalam penukar panas pada aliran *counter flow*.



Gambar 2.15. Distribusi Suhu Dalam Air Heater Untuk Jenis Aliran Counter Flow

(Sumber : Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, 1996)

Keterangan :

$T_{h,i}$ = temperatur inlet pada sisi panas, K

$T_{h,o}$ = temperatur outlet pada sisi panas , K

$T_{c,i}$ = temperatur inlet pada sisi dingin , K

$T_{c,o}$ = temperatur outlet pada sisi dingin, K

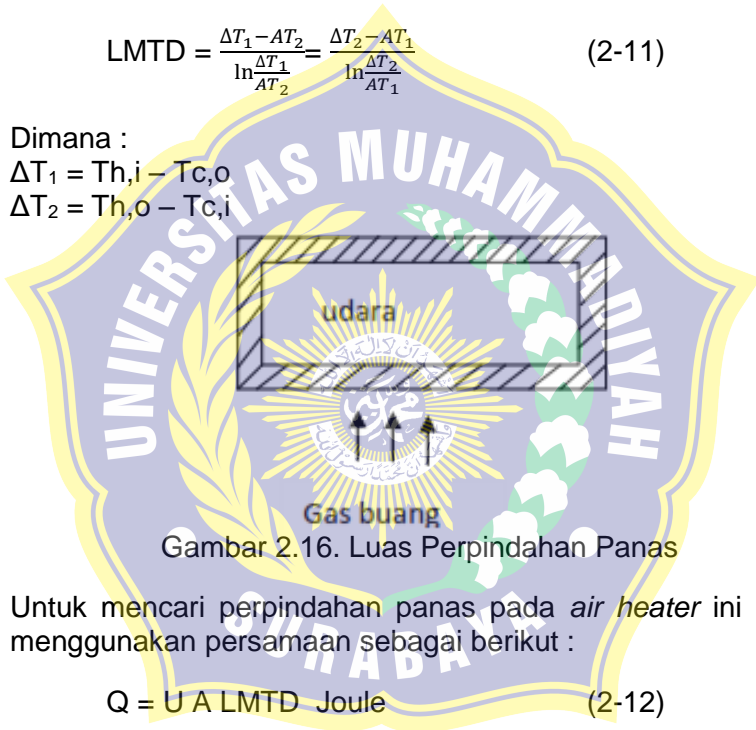
Maka nilai LMTD dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (2-11)$$

Dimana :

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$



Gambar 2.16. Luas Perpindahan Panas

Untuk mencari perpindahan panas pada *air heater* ini dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q = U A LMTD \text{ Joule} \quad (2-12)$$

Dimana :

A= luas perpindahan panas (m^2)

U= koefisien perpindahan panas menyeluruh

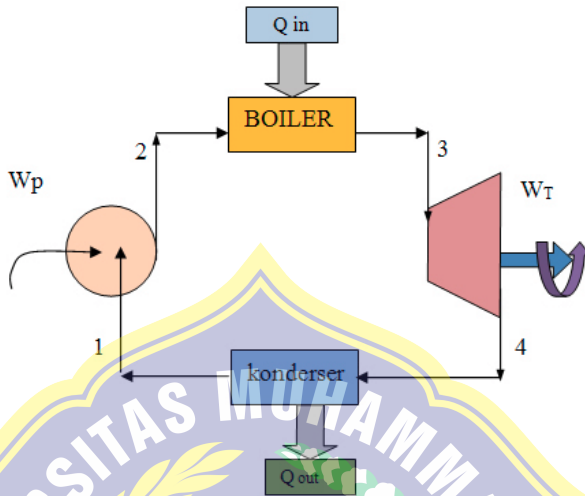
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{udara}} + \frac{1}{h_{gasbuang}}} \text{ (J/m}^2 \text{ K)} \quad (2-13)$$

2.5. Siklus Termodinamika

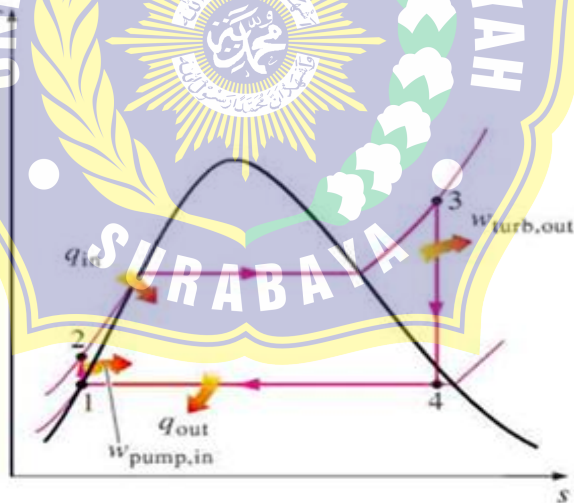
Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan di seluruh dunia.

Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap panas yang secara umum ditemukan di pembangkit listrik. Sumber panas yang utama untuk siklus Rankine adalah batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir, dan panas matahari. Siklus Rankine kadang-kadang diaplikasikan sebagai siklus Carnot, terutama dalam menghitung efisiensi. Perbedaannya hanyalah siklus ini menggunakan fluida yang bertekanan, bukan gas. Efisiensi siklus Rankine biasanya dibatasi oleh fluidanya. Tanpa tekanan yang mengarah pada keadaan super kritis, *range temperatur* akan cukup kecil. Uap memasuki turbin pada temperatur 565°C (batas ketahanan *stainless steel*) dan kondenser bertemperatur sekitar 30°C . Hal ini memberikan efisiensi Carnot secara teoritis sebesar 63%, namun kenyataannya efisiensi pada pembangkit listrik tenaga batu bara sebesar 42%.

Fluida pada Siklus Rankine mengikuti aliran tertutup dan digunakan secara konstan. Berbagai jenis fluida dapat digunakan pada siklus ini, namun air dipilih karena berbagai karakteristik fisika dan kimia, seperti tidak beracun, terdapat dalam jumlah besar, dan murah.



Gambar 2.17. Bagan Sederhana Siklus Rankine
(Sumber : Moran & Michael J, 2004)



Gambar 2.18. Diagram T-s Siklus Rankine
(Sumber : Moran & Michael J, 2004)

Siklus Rankine ideal tidak melibatkan *irreversibel internal* dan terdiri dari 4 tahapan proses :

1 – 2 merupakan proses kompresi isentropik dengan pompa

2 – 3 Penambahan panas dalam *boiler* pada $P = \text{konstan}$

3 – 4 Ekspansi isentropik ke dalam turbin

4 – 1 Pelepasan panas di dalam kondensor pada $P = \text{konstan}$

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik ini melalui sedikit pengurangan dari volume spesifik air. Jarak vertikal antara 1–2 pada T - s diagram ini biasanya dilebihkan untuk lebih amannya proses. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimanapanas diberikan oleh *boiler* ke air pada T 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 dihasilkanlah listrik. P dan T dari *steam* akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada P konstan di dalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini. Area dibawah kurva proses 2–3 menunjukkan panas yang ditransfer ke *boiler*, dan area dibawah kurva proses 4–1 menunjukkan panas yang dilepaskan dikondenser. Perbedaan dari kedua aliran ini adalah kerja *netto* yang dihasilkan selama siklus.

Penyimpangan Siklus Rankine

Penyimpangan dalam siklus Rankine yang terjadi karena :

1. Adanya friksi fluida yang menyebabkan turunnya tekanan di *boiler* dan kondensor sehingga tekanan

steam saat keluar *boiler* sangat rendah sehingga kerja yang dihasilkan turbin (*Wout*) 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_{in}) dalam proses bertambah sehingga efisiensi termalnya berkurang.

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.

2.6. Alat Pemanas Udara (*Air Heater*)

Alat pemanas udara merupakan alat *heat exchanger* yang mengeksploitasi energi panas yang terkandung pada gas buang (*flue gas*) untuk memanaskan udara pembakaran. Manfaat alat pemanas udara ini (*air heater*) sangat mendukung dalam peningkatan efisiensi pada *boiler*.

Alat pemanas udara (*air heater*) termasuk pada jenis sekunder. Meskipun temperatur gas buang (*flue gas*) yang akan dibuang ke atmosfer mempunyai temperatur minimum yaitu 170°C . Apabila pembuangan gas buang (*flue gas*) dibawa temperatur minimum ini, akan mengakibatkan terjadinya pengembunan pada gas buang (*flue gas*). Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya proses kondensasi pada permukaan saluran cerobong. Proses kondensasi ini menyebabkan terjadinya kadar asam dan sulfur dioksida. Sedikit saja timbul sulfur dioksida pada gas buang (*flue gas*) akan mempercepat kenaikan temperatur titik embun gas buang (*flue gas*) tersebut.

Alat pemanas udara (*air heater*) menyerap panas dari gas buang (*flue gas*) yang mana bertujuan untuk memanaskan udara pembakaran. Dalam hal ini alat pemanas udara terbagi menjadi dua jenis, yaitu : *rekuperatif* dan *regeneratif*.

Alat pemanas udara *rekuperatif* adalah alat pengalih panas dengan jenis plat yang bekerja sebagai unit. Arusnya

berlawanan arah atau aliran silang. Sedangkan alat pemanas udara *regeneratif* memakai sebuah susunan rotor besar yang hampir setengah elemennya dipasang pada saluran gas buang (*flue gas*) dan setengahnya lagi pada saluran suplai udara.

2.7. Jenis-Jenis Pemanas Udara

Pada dasarnya pemanas udara ada dua tipe yaitu :

1. Pemanas udara tipe *rekuperatif*

Pada alat pemanas udara tipe *rekuperatif*, kalor berpindah secara langsung dari panas gas buang (*flue gas*) ke udara yang melintas pada permukaan penukar kalor ini, biasanya berbentuk tabung, walaupun adayang berbentuk plat.

Unit model tabung biasanya berupa penukar kalor selongsongdan tabung aliran berlawanan arah, dimana gas mengalir di dalam tabung-tabung lurus vertikal dan horizontal.

Pemanas udara jenis tabung terdiri atas beberapa macam rancangan yang disesuaikan dengan ruang dan denah pembangkit uap. Pemanas udara ini ada yang mempunyai satu lintasan vertikal dan horizontal dan aliran searah dan berlawanan arah, alat pemanas udaraini dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.19. *Air Heater Rekuperatif*
(Sumber : http://cctech.com.au/products-air_heater.htm)

2. Pemanas udara tipe *regeneratif*

Pemanas udara jenis ini mempunyai sistem atau bekerja berdasarkan regenerasi. Unit ini terdiri dari rotor yang diputar oleh motor listrik melalui roda gigi reduksi sehingga berputar dengan kecepatan rendah 1-3 rpm.

Rotor ini dibagi oleh ruji-ruji dari plat dan dibagi beberapa sektor, dan sektor-sektor tersebut diisi oleh plat-plat tipis dan bergelombang sehingga terjadi suatu saluran yang sangat sempit yang menjadi *lalu*an udara dan asap.

Panas udara ini dapat dipakai untuk instalasi-instalasi darat maupun laut. Dengan susunan yang dibuat sedemikian rupa sehingga suatu fan menekan udara pembakaran ke dapur api melalui rotor, sedangkan sebagian fan menghisap gas asap dari saluran gas asap ke cerobong yang terletak di sebelah ruang pemisah (berbentuk sektor-sektor).

Gas-gas asap ini akan memanaskan lempengan-lempengan yang berombak seiring udara pembakaran akan masuk ke ruang pemisah, sedangkan disisi lain akan mengalami pemanasan dari lempengan-lempengan pemanas sehingga temperaturnya akan naik sesuai yang direncanakan.

Rotor akan menggerakkan pemanas udara secara perlahan-lahan, hal ini berfungsi untuk mengambil panas dari gas buang secara optimal dan sisi lainnya pemanas udara akan mengarahkan panas ke udara pembakar.



Gambar 2.20. *Air Heater Regeneratif*
(Sumber: <http://paragonairheater.com/clients.html>)

2.8. Prinsip Kerja Pemanas Udara (*Air Heater*)

Alat pemanas udara (*air heater*) yang digunakan tipe *regeneratif* yang memakai susunan rotor yang hampir setengah elemennya dipasang pada saluran gas buang (*flue gas*) dan setengah lagi dipasang pada saluran suplai udara pembakaran seperti gambar berikut :

Alat pemanas udara (*air heater*) khususnya di PLTU mempunyai dua sisi aliran yang berbeda yaitu sisi panas (*hot*) dan sisi dingin (*cool*). Sisi panas merupakan sisi aliran gas buang dan sisi dingin merupakan sisi aliran udara yang akan dipanaskan. Diantara sisi panas dan dingin terdapat elemen dari plat-plat yang mampu menyerap panas dan melepas panas. Ukuran penampang dari sisi panas lebih besar bila dibandingkan dengan sisi dingin, hal ini diharapkan supaya elemen dari alat pemanas udara ini mampu menyerap energi panas yang terkandung pada gas buang sebanyak mungkin.

Alat pemanas udara ini mempunyai kecepatan putaran sekitar 8 rpm. Hal ini mempunyai tujuan agar gas buang yang melewati sisi panas dapat bertahan lebih lama sehingga elemen ini mampu menyerap panas yang terkandung pada gas buang sebanyak mungkin dan pada elemen sisi dingin diharapkan udara yang lewat mampu menyerap panas dari elemen yang dipanaskan oleh gas buang.

Elemen yang berputar terdiri dari lapisan yang bergelombang dan secara bergantian dipanaskan gas buang dan sebaliknya didinginkan oleh udara. Elemen bergelombang tersebut terdiri dari dua sigmen yaitu: sigmen atas dan sigmen bawah. Dengan di putar oleh rotor posisi sisi panas dan dingin akan bergantian secara periodik.

2.9. Proses Perpindahan Panas Pada *Air Heater*

Menurut Hukum Termodinamika Kedua “Bahwa tidak mungkin menukarkan energi kalor keseluruhan menjadi tenaga bersih”. Akan tetapi menurut persamaan energi “Bahwa panas yang diserap sama dengan panas yang dilepas”, yaitu :

$$Q_{\text{serap}} = Q_{\text{lepas}}$$

Dimana pada alat pemanas udara fluida yang menyerap panas adalah udara, sedangkan fluida yang melepas panas adalah gas buang. Dalam hal ini besar panas yang diserap udara dan besar panas yang dilepas gas buang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Menurut Holman J.P (1993), sifat fluida dingin dievaluasi pada temperatur rata-rata adalah :

$$T_c = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2} \quad (2-13)$$

Dimana :

T_{ci} : temperatur udara masuk ($^{\circ}\text{C}$)

T_{co} : temperatur udara keluar ($^{\circ}\text{C}$)

Sedangkan untuk sifat fluida panas :

$$T_h = \frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} \quad (2-14)$$

Dimana :

T_{hi} : temperatur gas buang masuk ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ho} : temperatur gas buang keluar ($^{\circ}\text{C}$)

Menurut William J.S (1988) besar panas yang diserap fluida dingin (udara) adalah sebagai berikut :

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

$$Q_{\text{serap}} = m_{\text{udara}} \times c_{p\text{udara}} \times (T_{u,\text{out}} - T_{u,\text{in}}) \quad (2-15)$$

Dimana :

Q_{serap} : besar panas yang diserap udara (kJ/jam)

m : laju aliran massa udara (kg/jam)

$c_{p\text{udara}}$: panas jenis udara (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)

$T_{u,\text{out}}$: temperatur udara keluar ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{u,\text{in}}$: temperatur udara masuk ($^{\circ}\text{C}$)

Sedangkan panas yang dilepas gas buang adalah :

$$Q_{\text{lepas}} = m_{\text{g.buang}} \times c_{p \text{ g.buang}} \times (T_{\text{g.b.in}} - T_{\text{g.b.out}}) \quad (2-16)$$

Dimana :

Q_{lepas} : besar panas yang dilepas gas buang (kJ/jam)

m : laju aliran gas buang (kg/jam)

$C_{\text{g.buang}}$: panas jenis gas buang (kJ/kg °C)

$T_{\text{g.b.in}}$: temperatur gas buang masuk (°C)

$T_{\text{g.b.out}}$: temperatur gas buang keluar (°C)

2.10. Sifat Fisik Bahan Bakar

Api Gravity dan Specific Gravity (SG)

Berat jenis adalah salah satu sifat fisika hidrokarbon yang dalam Teknik Perminyakan umumnya dinyatakan dalam *Specific Gravity* (SG) atau dengan °API. *Specific Gravity* (SG) didefinisikan sebagai perbandingan antara densitas minyak dengan densitas air yang diukur pada tekanan dan *temperature* standar (60°F dan 14,7 psia).

Hubungan antara °API dengan *Spesific Gravity* (SG) adalah

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,4}{\text{SG}} = 131,5$$

Sedangkan penulisan SG adalah

$$\text{SG}_{\text{minyak}} = \frac{B_{\text{Jminyak}}}{B_{\text{Jair}}}$$

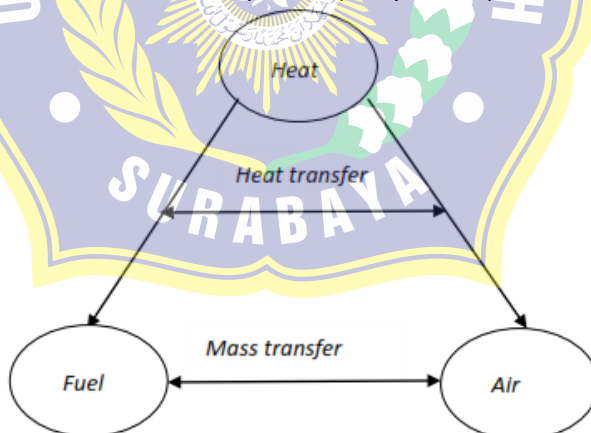
Harga °API untuk berat jenis minyak mentah (*crude oil*) antara lain :

- Minyak berat = 10 – 20 °API
- Minyak sedang = 20 – 30 °API
- Minyak ringan = > 30 °API

Specific Gravity dari minyak bumi adalah perbandingan antara berat yang diberikan oleh minyak bumi tersebut pada *volume* tertentu dengan berat air suling pada *volume* tertentu, dengan berat air suling pada *volume* yang sama dan diukur pada temperatur 60 °F. Sedangkan °API (*American Petroleum Institute*) *gravity* minyak bumi menunjukkan kualitas minyak bumi tersebut berdasarkan standar dari Amerika. Makin kecil berat jenis (SG) atau makin besar API-nya akan sedikit mengandung lilin atau residu aspal, atau paraffin. Namun dewasa ini minyak berat dapat dibuat fraksi bensin lebih banyak dengan menggunakan *metode cracking* dalam penyulingan, namun proses ini memerlukan banyak biaya.

2.11. Aliran Gas Buang dan Udara

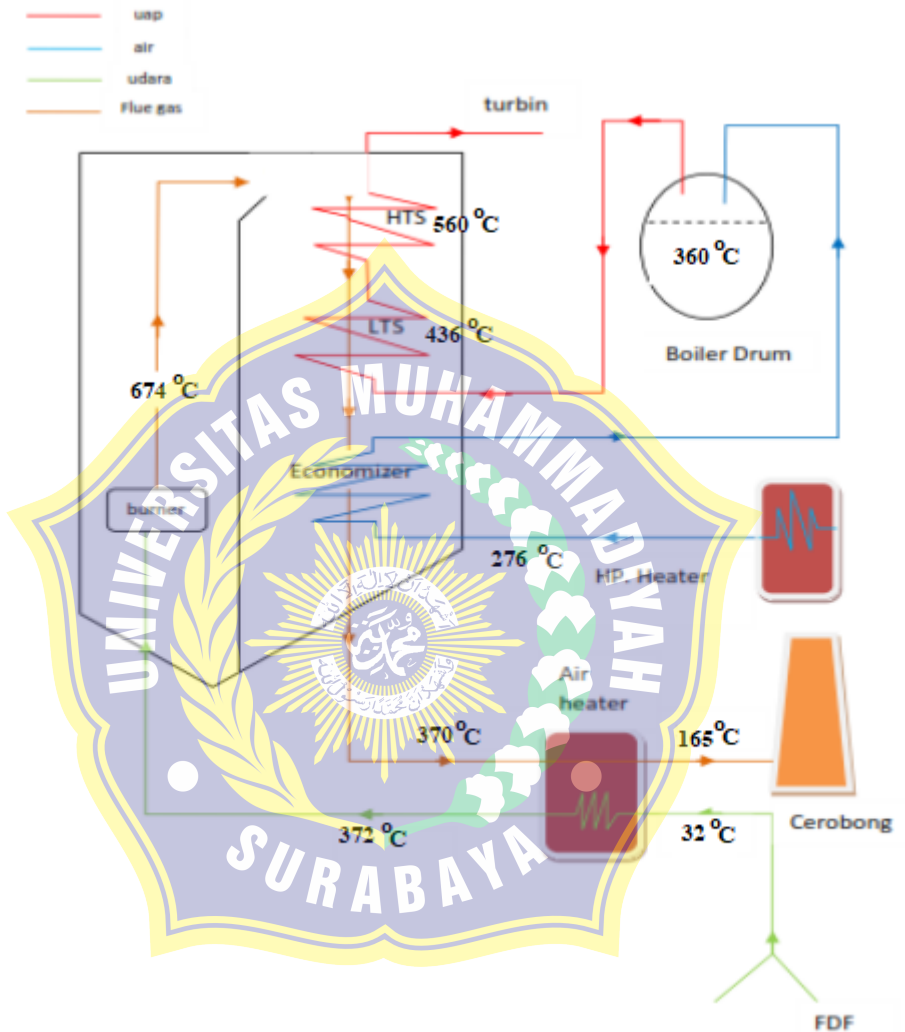
Ketel uap (*boiler*) merupakan alat yang dapat mengubah fase air menjadi fase uap, dengan memanfaatkan energi panas yang dihasilkan di dalam ruang bakar. Dimana untuk menghasilkan energi panas tersebut dibutuhkan tiga unsur yaitu : bahan bakar, udara , dan panas (temperatur).



Gambar 2.21. Skema Terjadinya Pembakaran
(Sumber: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle>)

Dari proses pembakaran tersebut akan dihasilkan panas yang berdampak pada temperatur, sedangkan sisa pembakaran adalah gas buang (*flue gas*). Gas buang dari ruang bakar digunakan untuk memanaskan air, uap, dan udara pembakaran, karena gas buang dari ruang bakar mempunyai temperatur dan tekanan yang tinggi sehingga dimanfaatkan untuk peningkatan efisiensi *boiler*.

Mula-mula udara luar dengan temperature 32°C masuk di bantu oleh *forced draught fan* (FDF) melewati air preheater (APH) sehingga meningkatkan temperature kerja menjadi 372°C, udara masuk ke *economizer* hingga sampai di ruang bakar dengan temperatur kerja mencapai 674°C. Dalam prosesnya udara panas tersebut juga digunakan dalam pemanasan air *feedwater* yang keluar dari deaerator dengan suhu 276°C melewati *economizer* bertemu dengan udara dari *flue gas* sehingga temperatur yang sampai ke *steam drum* mencapai 360°C, kemudian di dalam *steam drum* akan terpisah menjadi uap dan air. Proses uap akan diteruskan melauli *low temperature superheat* (LTSH) dengan kenaikan temperatur menjadi 436°C lalu melewati *high temperature superheater* (HTSH) meningkatkan temperatur menjadi 560°C membuat uap menjadi kering yang akan digunakan untuk memutar turbin dan generator. Untuk air yang terpisah didalam *steam drum* akan turun melalui *downcomer* yang nantinya melalui proses sirkulasi kembali masuk kedalam *tubing-tubing*. Untuk udara *flue gas* sendiri akan keluar melalui *air pre heater* (APH) dimana nanti di *air pre heater* (APH) terjadi pertukaran panas antara udara yang masuk dan udara yang keluar. Udara yang keluar melalui *air preheater* akan di alirkan keluar melalui cerobong dengan temperatur 165°C dijaga untuk tidak melebihi temperatur 170°C yang memungkinkan dapat membuat kerusakan pada udara di lingkungan sekitar.



Gambar 2.22. Aliran Uap, Air, Udara, dan Flue Gas
 (Sumber: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle>)

2.12. Efisiensi Boiler

Efisiensi termis boiler adalah energi panas masuk yang digunakan secara efektif untuk menghasilkan steam.

2.12.1. Efisiensi Pembakaran di dalam Furnace

Besarnya panas yang dihasilkan oleh burner (Q_{in}) :

$$Q_{in} = m \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (2-17)$$

Dimana :

Q = Kalor yang dihasilkan oleh burner (Kal)

m = massa bahan bakar yang di bakar (kg/s)

c_p = kapasitas panas bahan bakar (Kcal / kg ° C)

Δt = temperature ruang bakar (° C)

Sedangkan panas yang dihasilkan oleh gas buang (Q_{out}) :

$$Q_{out} = m \cdot c_p \cdot \Delta t$$

Dimana :

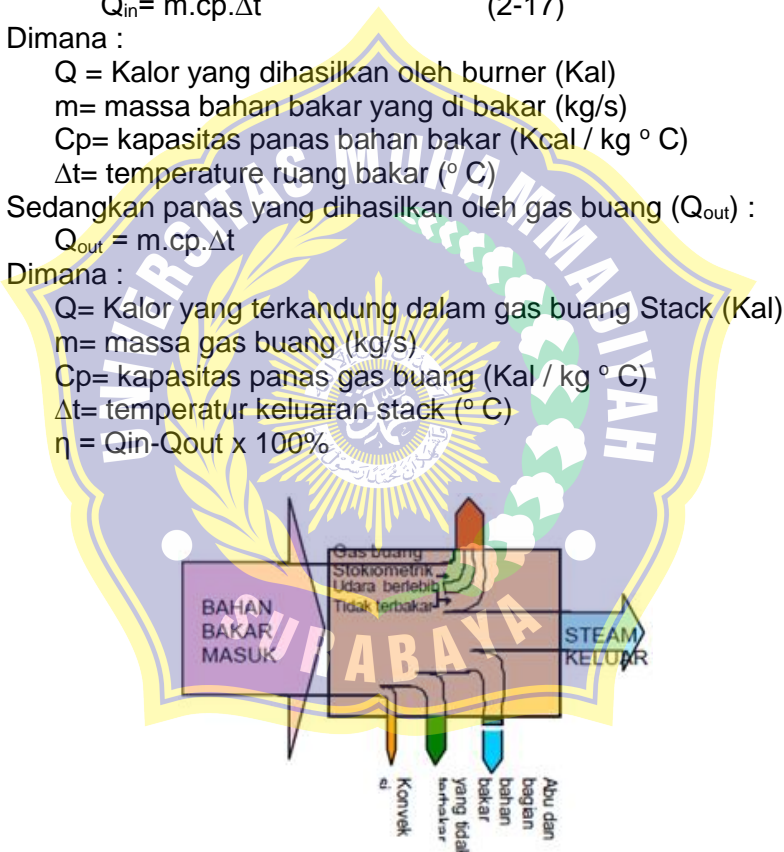
Q = Kalor yang terkandung dalam gas buang Stack (Kal)

m = massa gas buang (kg/s)

c_p = kapasitas panas gas buang (Kal / kg ° C)

Δt = temperatur keluaran stack (° C)

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$$



Gambar 2.23. Diagram Neraca Energi

(Sumber: <http://candle2life.blogspot.com/2011/11/performance-boiler.html>)

Neraca panas merupakan keseimbangan energi total yang masuk *boiler* terhadap yang meninggalkan *boiler* dalam bentuk yang berbeda. Gambar berikut memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan *steam*.

Terdapat dua metode pengkajian efisiensi *boiler* :

1. Metode Langsung

Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan *steam*) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar *boiler*. Metodologi Dikenal juga sebagai metode *input-output* karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/*output* (*steam*) dan panasmasuk/*input* (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi. Efisiensi *boiler* (η) ini dapat dievaluasi dengan menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{m_u(h_u - h_a)}{m_{bb} \times LHV} \times 100 \% \quad (2-18)$$

Dimana :

η = Efisiensi *boiler* (%)

m_u = jumlah *steam* yang dihasilkan per jam (kg/jam)

m_{bb} = jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (kg/jam)

h_u = entalpi uap (kJ/kg)

h_a = entalpi air (tabel thermodynamics, Cengel) (kJ/kg)

LHV = nilai kalor bahan bakar cangkang (kJ/kg)

Untuk menghitung massa uap, massa bahan bakar, LHV dan HHV dapat diketahui dengan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Menghitung *volume* air yang diuapkan dengan persamaan :

$$V_a = Adrum \cdot t \quad (2-19)$$

Dimana :

$Adrum$ = luas penampang drum

t_{air} = tinggi air yang digunakan saat proses penguapan

b. Menghitung massa air yang diuapkan dengan persamaan :

$$m_a = \rho \cdot V \quad (2-20)$$

Dimana :

m_a = massa air yang diuapkan (kg)
 ρ = massa jenis air (kg/liter)
 V = volume air yang diuapkan (liter)

c. Menghitung laju aliran uap dengan persamaan :

$$\dot{m}_u = \frac{m_a}{t} \quad (2-21)$$

Dimana :

\dot{m}_u = Laju aliran uap (kg/jam)
 m_a = Massa air (kg)
 t = Waktu (jam)

d. Menghitung laju aliran bahan bakar dengan persamaan :

$$\dot{m}_{bb} = \frac{m_{bb}}{t} \quad (2-22)$$

Dimana :

\dot{m}_u = Laju aliran bahan bakar (kg/jam)
 m_a = Massa bahan bakar (kg)
 t = Waktu (jam)

e. Menghitung nilai kalor tertinggi *highest heating value* (HHV) pada cangkang dengan persamaan :

$$HHV = 33.950 \times (C) + 144.200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9.400 (S) \quad (2-23)$$

Dimana :

HHV = *Highest Heating Value* (kJ/kg)
C = Unsur Carbon cangkang (%)
H = Unsur Hidrogen cangkang (%)
O₂ = Unsur Oksigen cangkang (%)
S = Unsur Sulfur cangkang (%)

f. Nilai kalor terendah *Lowest heating value* (LHV) pada cangkang dengan persamaan :

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (\text{H}_2\text{O} + 9 (\text{H}_2)) \quad (2-24)$$

Dimana :

LHV = *Lowest Heating Value* (kj/kg)

HHV = *Highest Heating Value* (kj/kg)

H₂H = Unsur Hidrodioksida (%)

O₂ = Unsur Hidrogen (%)

2. Metode Tidak Langsung

Efisiensi merupakan perbedaan antar kehilangan dan energi masuk. Metodologi Standar acuan untuk uji *boiler* di tempat dengan menggunakan metode tidak langsung adalah *British Standard, BS845:1987* dan *USA Standard ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units*.

Metode tidak langsung juga dikenal dengan metode kehilangan panas. Efisiensi dapat dihitung dengan mengurangi bagian kehilangan panas dari 100 sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi boiler} = 100\% - (i + ii + iii + iv + v + vi + vii)\% \quad (2-49)$$

Dimana kehilangan yang terjadi dalam *boiler* adalah kehilangan panas yang diakibatkan oleh :

- a. Gas cerobong yang kering
- b. Penguapan air yang terbentuk karena H
- c. Penguapan kadar air dalam bahan bakar
- d. Adanya kadar air dalam udara pembakaran dalam bahan bakar
- e. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam *fly ash*
- f. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam *bottom ash*
- g. Radiasi dan kehilangan lain yang tidak terhitung.

Kehilangan yang diakibatkan oleh kadar air dalam bahan bakar dan yang disebabkan oleh pembakaran hidrogen tergantung pada bahan bakar, dan tidak dapat dikendalikan oleh perancangan.

Data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi *boiler* dengan menggunakan metode tidak langsung adalah :

- Analisis *ultimate* bahan bakar (H_2 , O_2 , S, C, kadar air, kadar abu)
- Persentase oksigen atau CO_2 dalam gas buang
- Suhu gas buang dalam $^{\circ}C$ (t_f)
- Suhu awal dalam $^{\circ}C$ (T_a) dan kelembaban udara dalam kg/kg udara kering
- LHV bahan bakar dalam kkal/kg
- Persentase bahan yang dapat terbakar dalam abu (untuk bahan bakar padat)
- LHV abu dalam kkal/kg (untuk bahan bakar padat)

