

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Skema sistem udara pembakaran dan pembuangan flue gas

Salah satu unsur penting dalam reaksi pembakaran adalah oksigen. Oksigen diperoleh dari udara, udara yang digunakan untuk pembakaran batubara terdiri atas udara primer dan udara sekunder.

Udara primer yang bersuhu 40°C dihisap oleh primary air fan setelah sebelumnya melalui filter udara. Udara ini kemudian dipanaskan pada tri-sector air heater dengan memanfaatkan gas panas setelah melewati economizer agar kandungan air dalam udara primer dan sekunder menguap. Udara ini kemudian disalurkan ke penggiling batubara (Pulverizer) dengan dikendalikan oleh control dampers agar menstabilkan gabungan udara dingin dan udara panas sesuai dengan jumlah dan temperatur yang dibutuhkan masing-masing pulverizer yaitu 300°C. Udara panas ini akan memanaskan batubara dan mengeringkan batubara. Udara primer ini membawa batubara yang sudah dihancurkan menjadi serbuk sebesar 200 mesh menuju ke burner pada boiler. Jadi udara primer berfungsi sebagai :

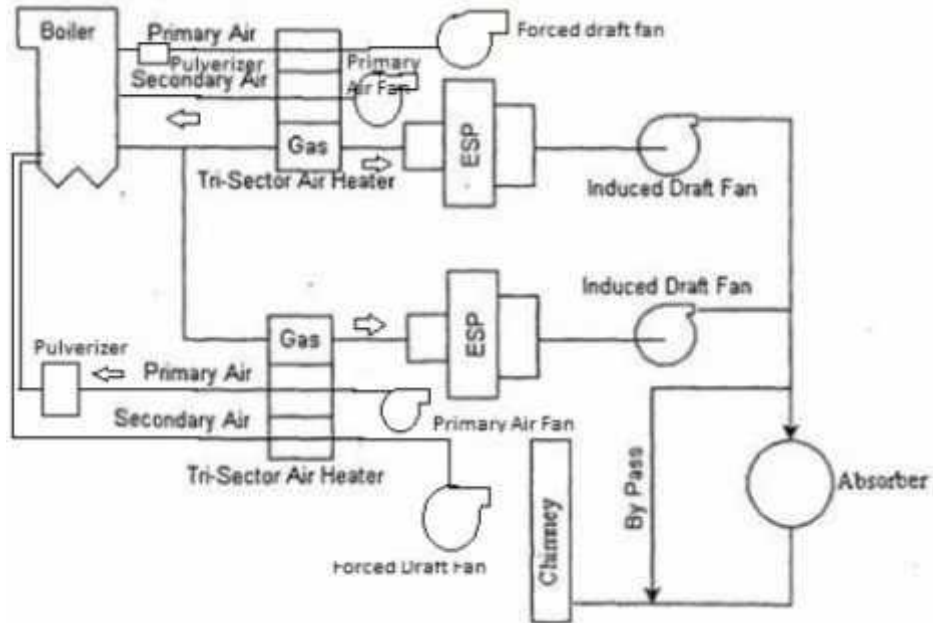
- a. Memanaskan batubara.
- b. Menyediakan udara untuk masing-masing pulverizer guna mentransport batubara menuju ruang bakar.

Sedangkan udara sekunder dihasilkan oleh *force draft fan*. Udara yang dihasilkan *force draft fan* kemudian menuju ke *secondary air heater* untuk dipanaskan lagi dengan memanfaatkan gas pembakaran setelah melewati *economizer*. Tujuan pemanasan ini adalah udara cukup panas (sekitar 300°C)

sehingga memudahkan proses pembakaran. Dari pemanas ini udara sekunder dialirkan ke wind box yang dihubungkan ke lubang udara pembakaran pada Burner. Fungsi udara ini selain sebagai pemasok udara pembakaran juga sebagai pendingin bagian-bagian pembakar (Firing System) agar tidak rusak karena panas (radiasi) api. Jadi fungsi dari udara sekunder adalah sebagai pemasok udara pembakaran di dalam furnace.

Di dalam boiler terjadi pencampuran antara batubara serbuk, udara primer, dan udara sekunder yang kemudian dibakar. Hasil pembakaran berupa gas panas dan abu. Gas panas yang terjadi dialirkan ke saluran (*Duct*) untuk memanaskan steam drum, pipa-pipa *wall tube* dan *down comer*, pipa pemanas lanjut (*Superheater*), pemanas ulang (*Reheater*) dan *economizer*. Setelah dari *economizer* gas masih bertemperatur tinggi yaitu sekitar 400°C dan dipergunakan sebagai sumber untuk memanaskan udara pada air heater.

Keluar dari boiler, gas dialirkan ke *electrostatic precipitator* untuk diambil abu hasil pembakaran boiler dengan efisiensi penyerapan abu sekitar 99,5%. Sedang sisanya terbawa bersama udara dihisap oleh induced draft fan dan akhirnya dibuang ke lingkungan melalui cerobong (*stack*).



(Sumber : Ahmad Sutopo, UGM, 2013, hal 7)

Gambar 2.1 Siklus *flue gas*, udara primer dan udara sekunder

2.2 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor dari suatu zat ke zat lain seringkali terjadi dalam kehidupan sehari-hari baik penyerapan atau pelepasan kalor, untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan sewaktu proses berlangsung. Kalor sendiri adalah salah satu bentuk energi. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak musnah, contohnya hukum kekekalan massa dan momentum, ini artinya kalor tidak hilang. Energi hanya berubah bentuk dari bentuk yang pertama ke bentuk yang kedua. Kalor dapat berpindah dengan tiga macam cara yaitu:

1. Pancaran, sering juga dinamakan radiasi.
2. Hantaran, sering juga disebut konduksi.
3. Aliran, sering juga disebut konveksi.

2.2.1. Pancaran (radiasi)

Pancaran (radiasi) ialah perpindahan kalor melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain. Semua benda memancarkan kalor. Keadaan ini baru terbukti setelah suhu meningkat. Apabila sejumlah energi kalor menimpa suatu permukaan, sebagian akan dipantulkan, sebagian akan diserap ke dalam bahan, dan sebagian akan menembusi bahan dan terus ke luar. Jadi dalam mempelajari perpindahan kalor radiasi akan dilibatkan suatu fisik permukaan.

Ciri-ciri radiasi yaitu :

1. Kalor radiasi merambat lurus.
2. Untuk perambatan itu tidak diperlukan medium (misalnya zat cair atau gas).

2.2.2. Hantaran (konduksi)

Hantaran ialah pengangkutan kalor melalui satu jenis zat. Sehingga perpindahan kalor secara hantaran/konduksi merupakan satu proses dalam karena proses perpindahan kalor ini hanya terjadi di dalam bahan. Arah aliran energi kalor adalah dari titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah.

Bahan yang dapat menghantar kalor dengan baik dinamakan konduktor. Penghantar yang buruk disebut isolator. Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor ialah koefisien konduksi termal. Apabila nilai koefisien ini tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat. Untuk bahan isolator koefisien ini bernilai kecil. Pada umumnya, bahan yang dapat menghantar arus listrik dengan sempurna (logam) merupakan penghantar yang baik juga untuk kalor dan sebaliknya. Selanjutnya bila diandaikan sebatang besi atau sembarang jenis logam dan salah satu ujungnya diulurkan ke dalam nyala api. Dapat

diperhatikan bagaimana kalor dipindahkan dari ujung yang panas ke ujung yang dingin. Apabila ujung batang logam tadi menerima energi kalor dari api, energi ini akan memindahkan sebagian energi kepada molekul dan elektron yang membangun bahan tersebut.

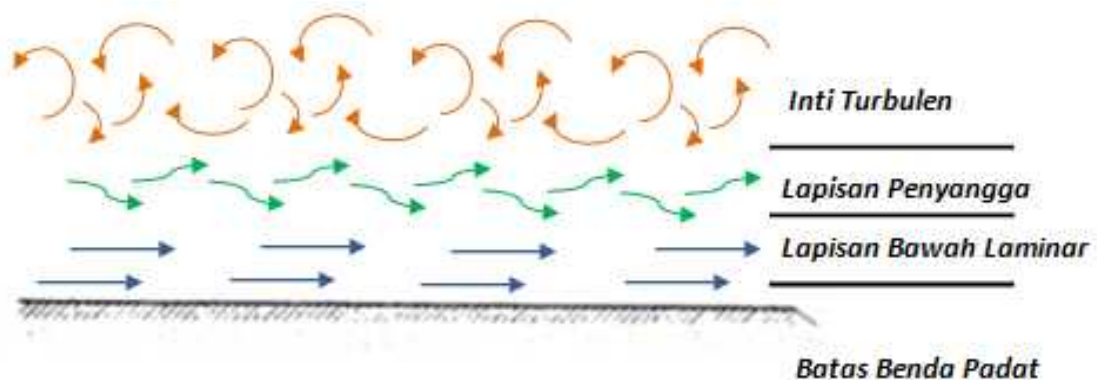
2.2.3 Aliran (konveksi)

Aliran ialah perpindahan kalor oleh gerak dari zat yang dipanaskan. Proses perpindahan kalor secara aliran/konveksi merupakan satu fenomena permukaan. Proses konveksi hanya terjadi di permukaan bahan. Jadi dalam proses ini struktur bagian dalam bahan kurang penting. Keadaan permukaan dan keadaan sekelilingnya serta kedudukan permukaan itu adalah yang utama. Lazimnya, keadaan kesetimbangan termodinamik di dalam bahan akibat proses konduksi, suhu permukaan bahan akan berbeda dari suhu sekelilingnya. Dalam hal ini terdapat keadaan suhu tidak setimbang diantara bahan dengan sekelilingnya.

2.2.4 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran laminar dan turbulen ini dibedakan berdasarkan pada karakteristik internal aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami oleh suatu aliran yang mempengaruhi gerak dari partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami oleh medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida tersebut dan aliran fluida tersebut disebut aliran laminar. Fluida dapat dianggap bergerak dalam bentuk lapisan-lapisan dengan pertukaran molekuler yang hanya terjadi diantara lapisan-lapisan yang

berbatasan untuk kondisi tersebut. Gangguan yang timbul semakin besar hingga tercapai kondisi peralihan pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, di mana partikel bergerak secara fluktuasi atau acak dan terjadi percampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatasan. Kondisi aliran yang demikian disebut dengan aliran turbulen.



(Sumber : F. Kreith, 1991, hal 311)

Gambar 2.2 Struktur aliran turbulen didekat benda padat

Perbedaan yang mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah bahwa gerak olakan / acak pada aliran turbulen jauh lebih efektif dalam pengangkutan massa serta momentum fluidanya daripada gerak molekulernya. Tidak ada hubungan yang bisa dipastikan secara teoritis antara medan tekanan dan kecepatan rata-rata pada aliran turbulen sehingga pada analisa aliran turbulen dilakukan dengan pendekatan setengah empiris. Kondisi aliran yang laminar dan turbulen ini dapat dinyatakan dengan bilangan Reynold.

2.2.5. Reynold Number

Reynold number (Re) atau bilangan Reynold adalah suatu bilangan tanpa dimensi yang menganalisa gaya inersia Fluida. Jenis aliran Fluida dan gaya

gesekan yang terjadi dengan permukaannya akan menentukan Bilangan Reynold. Aliran Fluida dapat dibagi dalam tiga kategori : Laminar, Transisi dan Turbulen.

Untuk membedakan antara aliran laminar, transisi, dan turbulen maka digunakan bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynolds, yang merupakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya viskos. Jadi, rumus bilangan reynold adalah¹ :

$$Re = \frac{\rho \cdot u_m}{\mu} \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

dan,

$$\dot{m} = \rho \cdot u_m \cdot A \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

persamaan 2-8 dan 2-9 di substitusi, maka menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi D \mu} \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

di mana : D = Diameter penampang saluran, m

= Laju massa fluida, kg/s

μ = Viskositas, kg/s m

= Massa Jenis Fluida, kg/m³

A_c = Luas penampang saluran, m²

u_m = Kecepatan aliran fluida, m/s

¹ Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, *op. cit*, hal 469-470.

Pada aliran laminar molekul molekul fluida mengalir mengikuti garis-garis aliran secara teratur. Aliran turbulen terjadi saat molekul-molekul fluida mengalir secara acak tanpa mengikuti garis aliran. Aliran transisi adalah aliran yang berada diantara kondisi laminar dan turbulen, biasanya pada kondisi ini aliran berubah-ubah antara transien dan turbulen sebelum benar-benar memasuki daerah turbulen penuh.

Nilai bilangan Reynolds yang kecil (< 2100) menunjukkan aliran bersifat laminar sedangkan nilai yang besar menunjukkan aliran turbulen (> 4000). Nilai bilangan Reynolds saat aliran menjadi turbulen disebut bilangan Reynolds kritis yang nilainya berbeda-beda tergantung bentuk geometrinya.

2.2.6 Prandtl Number

Bilangan tak berdimensi selanjutnya adalah Bilangan Prandtl yang merupakan perbandingan antara ketebalan lapis batas kecepatan dengan ketebalan lapis batas termal. Bilangan Prandtl (Pr) merupakan sifat-sifat fluida saja dan hubungan antara distribusi suhu dan distribusi kecepatan. Bila bilangan Prandtlnya lebih kecil dari satu, gradien suhu di dekat permukaan lebih landai daripada gradien kecepatan, dan bagi fluida yang bilangan Prandtlnya lebih besar daripada satu gradien suhunya lebih curam daripada gradien kecepatan. Bilangan Prandtl dinyatakan dengan persamaan² :

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu Cp}{k} \quad \dots\dots(2-4)$$

² F. Kreith, op. cit., hal 420

dimana : C_p = Kalor spesifik fluida pada tekanan tetap, J/kg K

k = Konduktivitas termal, Watt

μ = Viskositas, kg/s m

ν = Viskositas kinematik, m^2/s

= Diffuvisitas termal, m^2/s

Nilai bilangan Prandtl berkisar pada nilai 0.01 untuk logam cair, 1 untuk gas, 10 untuk air, dan 10000 untuk minyak berat. Difusivitas kalor akan berlangsung dengan cepat pada logam cair ($Pr \ll 1$) dan berlangsung lambat pada minyak ($Pr \gg 1$). Pada umumnya nilai bilangan Prandtl ditentukan menggunakan tabel sifat zat.

Tabel 2.1 Rentang Nilai Bilangan Prandtl Untuk Fluida

Cairan	Pr
Logam cair	0,004 – 0,03
Gas	0,7 – 1,0
Air	1,7 – 13,7
Cairan Organik Ringan	5 – 50
Minyak	50 -100000
Gliserin	2000 -100000

2.2.7. Nusselt Number

Perpindahan kalor yang terjadi pada suatu lapisan fluida terjadi melalui proses konduksi dan konveksi. Bilangan Nusselt menyatakan perbandingan antara perpindahan kalor konveksi pada suatu lapisan fluida dibandingkan

dengan perpindahan kalor konduksi pada lapisan fluida tersebut. Dapat di tulis dengan persamaan³:

$$Nu_D = \frac{h.L}{k} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

$$Nu_D = 0,023 R_{ed}^{0,8} F_r^n \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

dimana : h = Koefisien perpindahan panas konveksi, $W/m^2 k$

L = Panjang karakteristik, m

k = Konduktivitas bahan, $W/m K$

n = 0,5 for heating ($T_s > T_m$), 0,3 for cooling ($T_s < T_m$)

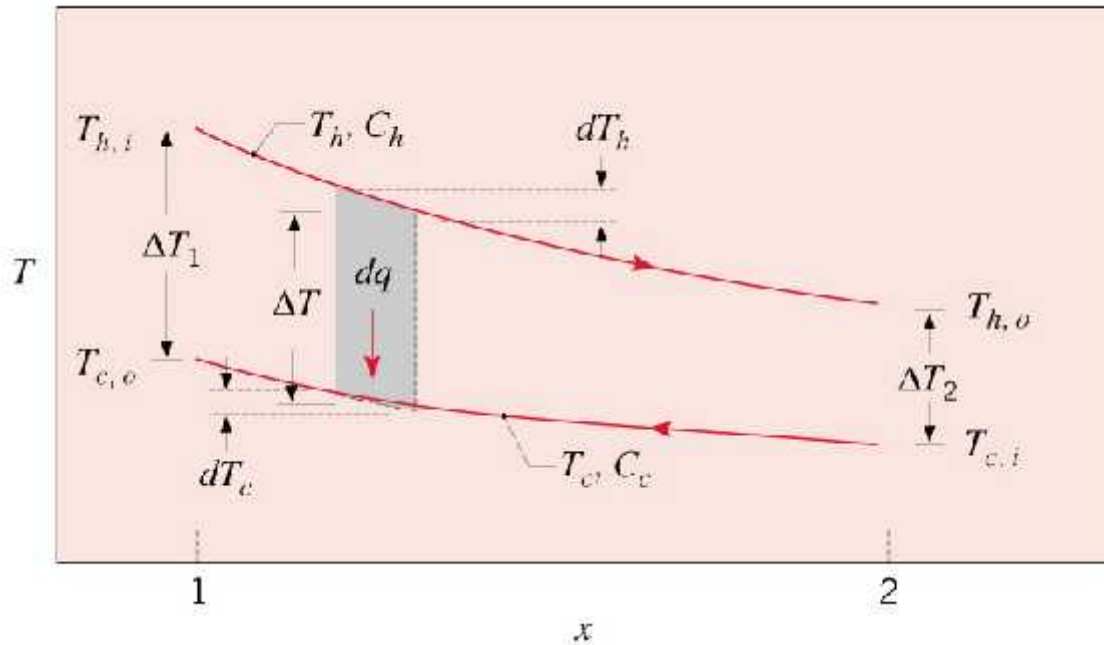
Semakin besar nilai bilangan Nusselt maka konveksi yang terjadi semakin efektif. Bilangan Nusselt yang bernilai 1 menunjukkan bahwa perpindahan kalor yang terjadi pada lapisan fluida tersebut hanya melalui konduksi.

2.2.8 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 2.5 menggambarkan perubahan suhu yang

³ Incroperara, F. P. and D. P. Dewitt, *op. cit.*, hal 496

dapat terjadi pada salah satu atau kedua fluida dalam penukar panas pada aliran *counterflow*.



(Sumber : Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, 1981, hal 649)

Gambar 2.3 Distribusi Suhu Dalam Penukar Panas untuk jenis aliran *counterflow*

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

a dan b menunjuk kepada masing-masing ujung penukar panas.

Maka nilai LMTD dapat dihitung dengan menggunakan persamaan⁴:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

⁴ Ibid, hal. 557.

$$\text{di mana : } \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

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

2.2.9. Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas keseluruhan adalah besarnya energi yang dipindahkan setiap satuan waktu saat proses perpindahan panas dalam alat penukar kalor berlangsung. Satuan yang biasa dipakai untuk menjelaskan nilai laju perpindahan panas adalah *British Thermal Unit* per jam (Btu/h), serta yang umum kita gunakan adalah satuan Joule per second (J/s) yang juga biasa disebut Watt (W). Untuk mencari nilai laju perpindahan panas dapat digunakan rumus-rumus berikut ini⁵ :

$$q = U \times A \times LMTD \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

di mana :

q = laju perpindahan panas keseluruhan (J/s = W)

U = Koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m² °C)

A = Luas area perpindahan panas keseluruhan (m²)

$LMTD$ = log mean temperature difference (°C)

Jika nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan (U) bernilai konstan, serta perubahan energi kinetik diabaikan maka persamaan di atas dapat diintegrasikan lagi menjadi persamaan kesetimbangan energi berikut ini :

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} \Delta T_h = \dot{m}_c c_{p,c} \Delta T_c \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

⁵ Frank Kreith, Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas, edisi ketiga, Erlangga, Jakarta 1991, hal. 555

di mana :

q = laju perpindahan panas keseluruhan (J/s = W)

\dot{m}_h = flow sisi panas (kg/s)

$c_{p h}$ = kalor spesifik sisi panas (kJ/kg°C)

ΔT_h = Selisih temperatur sisi panas (°C)

\dot{m}_c = flow sisi dingin (kg/s)

$c_{p c}$ = kalor spesifik sisi dingin (kJ/kg°C)

ΔT_c = Selisih temperatur sisi dingin (°C)

2.2.10. Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (U)

Koefisien perpindahan panas keseluruhan adalah nilai koefisien perpindahan panas yang didapat dari parameter koefisien pada fluida dingin dan fluida panas yang bekerja pada alat penukar panas. Nilainya dapat berubah-ubah seiring dengan perubahan suhu yang terjadi pada proses perpindahan panas. Dalam kajian rancang bangun alat penukar panas, biasanya nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan ini dianggap konstan. Tapi pada saat melakukan evaluasi kinerja alat penukar kalor, nilai koefisien perpindahan panas justru bisa digunakan sebagai parameter utamanya, karena koefisien ini erat hubungannya dengan tahanan (resistansi). Nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat dihitung dengan persamaan⁶ :

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{in}}\right) + \left(\frac{1}{h_{out}}\right)} \quad \dots\dots\dots(2-10)$$

⁶ Kern, D. Q., Process Heat Transfer, Mc Graw-Hill. Book Co., 1950, hal 121.

Dapat juga dengan menggunakan persamaan (2-8) :

$$U = \frac{q}{A \times LMTD}$$

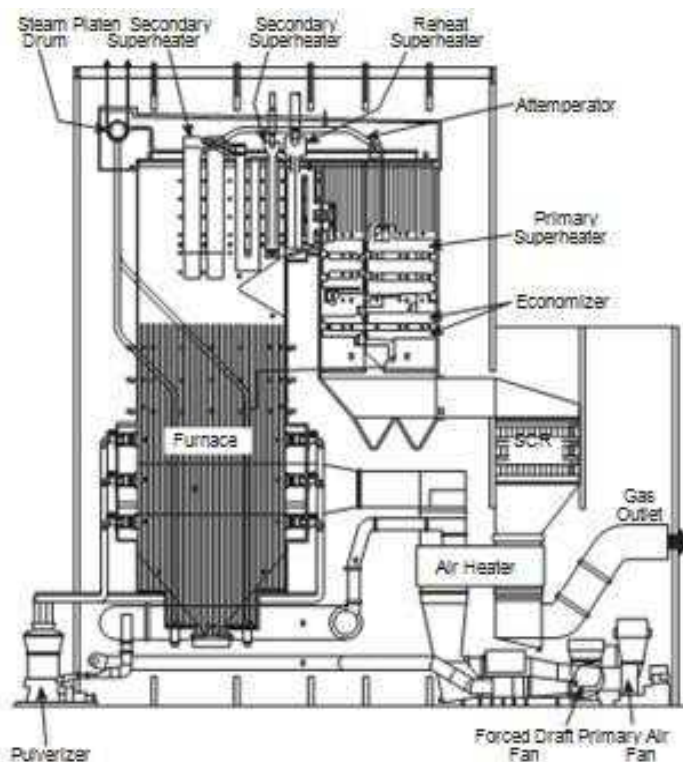
2.3 Pengertian *Heat Exchanger*

Heat Exchanger adalah alat untuk memindahkan energi panas dari suatu fluida ke fluida lain. Fluida panas memberikan panasnya ke fluida dingin melalui suatu media atau secara langsung sehingga akan terjadi perubahan sesuai dengan yang dikehendaki, baik penurunan maupun kenaikan temperature. Pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar, banyak sekali peralatan penukar kalor seperti ketel uap (*boiler*), pemanas lanjut (*super heater*), pendingin oli pelumas (*oil cooler*), kondenser (*condensor*), pemanas air (*water heater*) dan pemanas udara (*air heater*).

2.4 *Heat Exchanger Air Preheater*

Air Heater pada PLTU digunakan untuk memanaskan udara pembakaran dan meningkatkan proses pembakaran. prinsipnya, *flue gas* adalah sumber energi dan *air heater* berfungsi sebagai perangkap panas untuk mengumpulkan dan menggunakan hasil panas untuk proses di dalam *boiler*. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi *boiler* secara keseluruhan efisiensi yang dihasilkan 5 sampai 10%. Unit-unit ini biasanya difungsikan untuk mengontrol temperatur udara dan temperatur gas yang akan masuk kedalam *boiler*. *Air heater* terletak dibawah *economizer* , seperti yang digambarkan dalam Gambar 2.1 di mana *air heater* menerima *flue gas* dari *economizer* dan udara dingin dari *forced draft fan*

dan *primary air fan*. Udara panas yang dihasilkan oleh *air heater* meningkatkan pembakaran bahan bakar dan membawa batubara menuju *burner* untuk dibakar dari *pulverizer*.



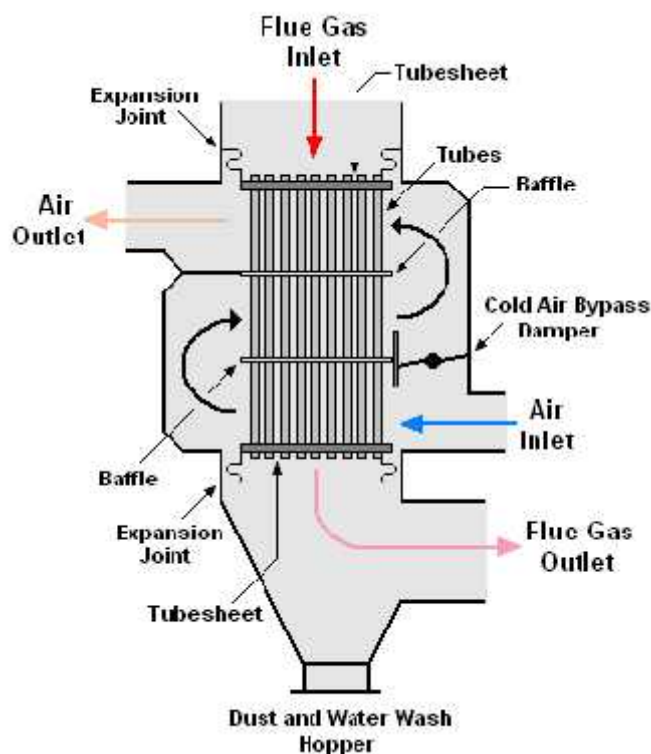
(Sumber : Ahmad Sutopo, UGM, 2013, hal 11)

Gambar 2.4 Komponen-komponen proses pembakaran *boiler*

2.4.1 *Tubular Air Preheater*

Air preheater jenis ini biasanya terdiri dari sejumlah *tube steel* dengan diameter 40 sampai 65 mm dengan cara las dalam penyambungannya atau di sambung pada *tube plate* di ujungnya. Baik gas ataupun udara dapat mengalir melalui *tube*. *Tubular Preheaters* terdiri dari tabung-tabung yang di susun sejajar (*Straight tube bundles*) melewati saluran *outlet* dari boiler dan terbuka pada setiap sisi akhir saluran (*ducting*).

Ducting atau saluran gas buang yang berasal dari *furnace* melewati seluruh *preheaters tubes*, transfer panas yang terjadi dari gas buang untuk udara bakar di dalam *preheater*. Udara ambien di paksa oleh *fan* untuk melewati di salah satu ujung pada saluran dari *tubular air preheater* dan udara yang dipanasi pada ujung lainnya dari dalam sudah berupa udara panas yang mengalir ke dalam boiler dan digunakan untuk udara pembakaran guna menaikkan efisiensi thermal boiler.



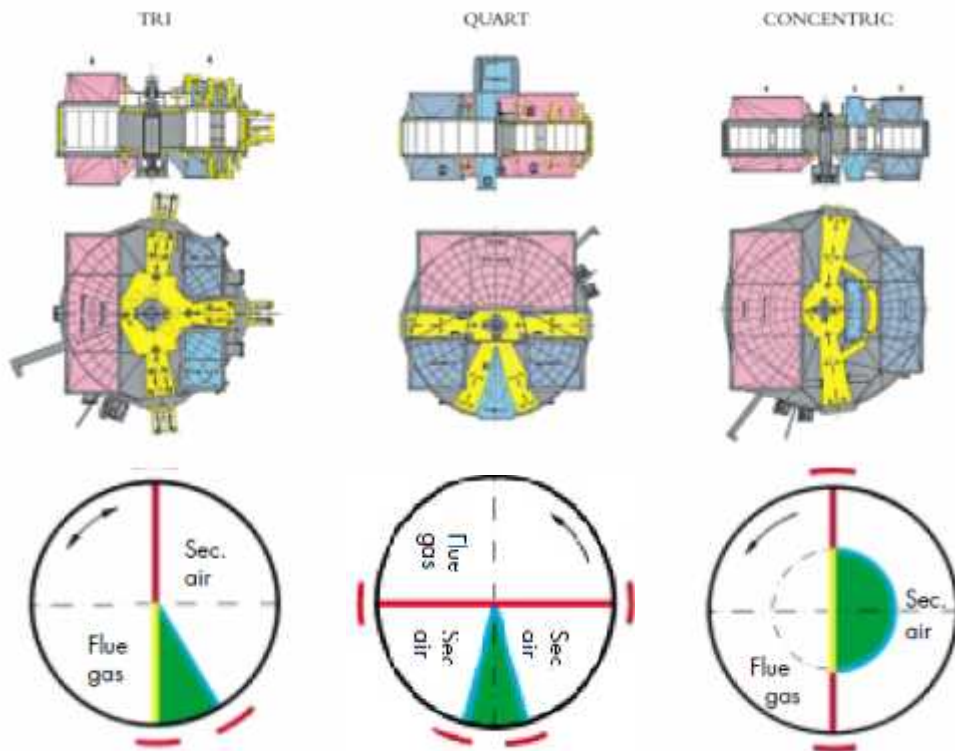
(Sumber: http://en.citizendium.org/wiki/Air_preheater)

Gambar 2.5 *Tubular Air Preheater*

2.4.2 *Regenerative Air Preheater*

Regenerative air preheater merupakan tipe *heater* dengan *rotating plate* yang terdiri dari plat-plat yang tersusun secara sedemikian rupa dan dipasang di dalam sebuah *casing* yang terbagi menjadi beberapa bagian yaitu dua bagian (*bi-sector type*), tiga bagian (*tri-sector type*) atau empat bagian (*quart-sector type*).

Setiap sector dibatasi dengan seal yang berguna untuk membatasi aliran udara/gas yang mengalir. Seal memungkinkan elemen-elemen yang ada didalamnya dapat berputar pada semua sektor, tetapi tetap menjaga agar kebocoran gas/udara antar sektor dapat diminimalisir sekaligus memberikan jalur pemisah antara udara bakar dengan gas buang.



(Sumber : Alstom, 1998, hal 3)

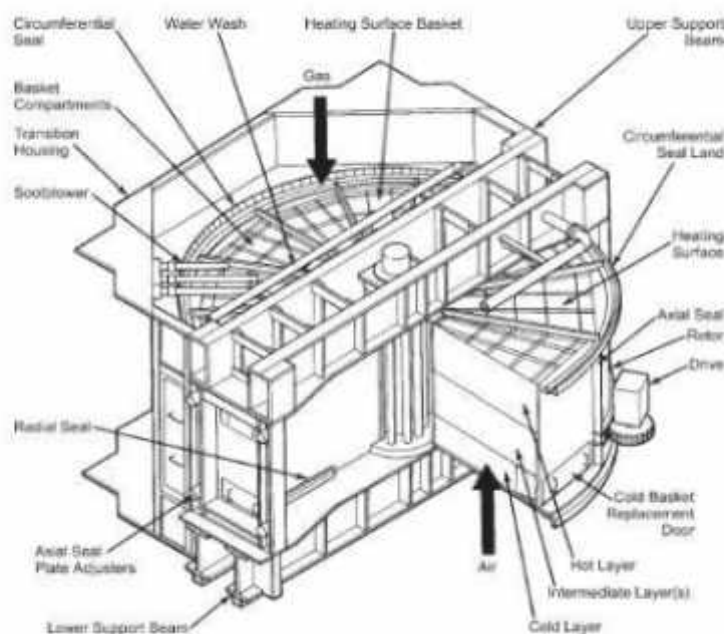
Gambar 2.6 Air Preheater Tipe Tri-sector, Tipe Quart-Sector, dan Concentric-Sector.

Tri-sector adalah jenis yang paling banyak digunakan pada pembangkit modern saat ini (Gb 2.6). Dalam desain *tri-sector*, sektor terbesar (biasanya mencakup sekitar setengah dari penampang casing) dihubungkan dengan *outlet* boiler (*economizer*) berupa gas buang yang masih memiliki temperatur tinggi. Gas buang mengalir diatas permukaan elemen, dan kemudian mengalir menuju ke *dust collectors* untuk menangkap debu-debu yang terbawa oleh gas buang sebelum di

buang menjadi tumpukan gas buang. Sektor kedua, yang lebih kecil dihembuskan udara ambien oleh *fan* yang selanjutnya melewati elemen pemanas yang berputar dan udara mengambil panas darinya sebelum masuk ke dalam ruang bakar untuk pembakaran. Sektor ketiga, yang terkecil digunakan untuk pemanas udara ambien yang nantinya akan diarahkan ke pulverizer membawa campuran batubara dengan udara ke boiler untuk pembakaran.

2.4.2.1 *Ljungstrom Air Heater*

Ljungstrom Air Heater adalah yang paling umum pada tipe *regeneratif* yang dilengkapi dengan *shell silinder* ditambah *rotor* dengan rangkaian elemen pemanasan yang diputar dan dilalui udara primer dan sekunder yang berlawanan dengan aliran gas. *Rotor* ini dibatasi oleh penempatan tetap yang memiliki saluran pada kedua ujungnya. udara mengalir melalui setengah dari *rotor* dan aliran gas melalui setengah lainnya. *Seal* digunakan untuk meminimalisir kebocoran gas. Lihat Gambar.2.6 bantalan di atas dan bawah penyusunan penyangga menopang dan mengantar *rotor* pada pusat poros. Kecepatan *rotor* pada tipe *Ljungstrom* yaitu satu sampai tiga *rpm* . Desain poros baik vertikal maupun horisontal digunakan untuk mengakomodir berbagai udara pembangkit dan aliran gas. Desain poros vertikal lebih umum dipakai pada tipe *Ljungstrom air heater*.



(Sumber : Ahmad Sutopo, UGM, 2013, hal 16)

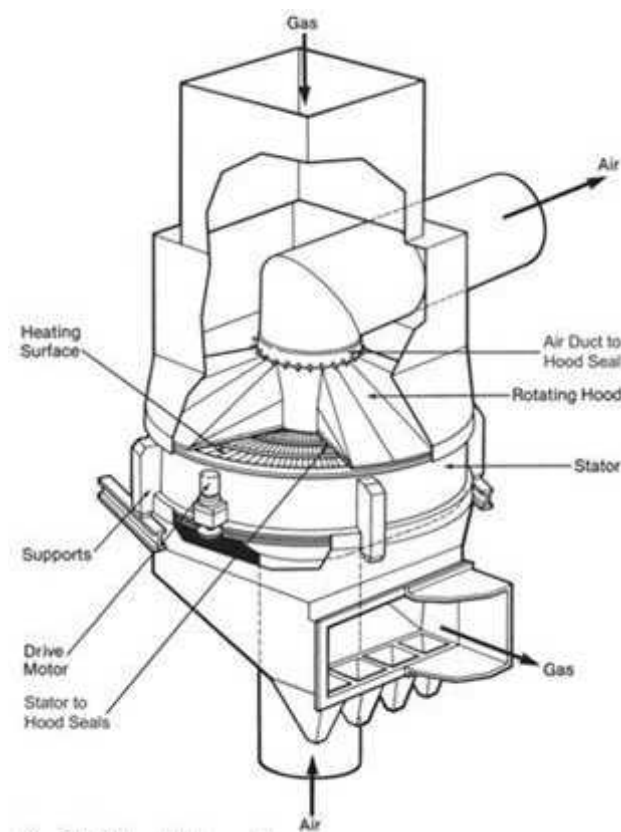
Gambar 2.7 Komponen air heater tipe Ljungstrom

Pengaturan aliran yang paling umum adalah aliran *counter flow* yaitu gas panas yang memasuki bagian atas *rotor* dan udara dingin memasuki bagian bawah *rotor*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pemanas yang menggunakan skema aliran ini diidentifikasi sebagai *hot end on top* dan *cold end on bottom*. Dalam pengoperasiannya, *rotor* terkena suhu yang berbeda, panas pada bagian atas dan dingin pada permukaan bawah, sehingga menyebabkan *rotor* melentur (atau mengubah bentuk) ke atas. Perubahan bentuk *rotor* ini membuka celah antara *rotor* itu sendiri yang menyebabkan kebocoran terjadi antara bagian udara ke sisi gas.

2.4.2.2 *Rothemühle* Air Heater

Rothemühle air heater adalah jenis *regeneratif* air heater yang menggunakan unsur-unsur permukaan *stasioner* dan saluran yang berputar. Panas

ditransfer sebagai aliran arus yang diarahkan melalui permukaan pemanas dengan aliran *counter flow*, salah satu aliran arus yang berada di dalam penutup adalah aliran udara dan aliran lain di luar penutup adalah aliran *flue gas*.



(Sumber : Ahmad Sutopo, UGM, 2013, hal 18)

Gambar 2.8 Air Heater tipe Rothemühle

Rothemühle air heater stators mendistorsi dengan cara yang mirip dengan *rotor Ljungstrom*. Sistem penutupan khusus dipasang untuk memutar kap dengan stator yang digunakan untuk mengontrol kebocoran.

2.5 Losses (Kerugian-kerugian)

Adanya kerugian-kerugian (*losses*) yang terjadi mengakibatkan penurunan kinerja dari *air heater*. Kerugian-kerugian yang sering ditemukan

antara lain, adanya faktor pengotoran (*fouling factor*), kebocoran udara (*air leakage*), kerugian aliran.

2.5.1 Faktor Pengotoran (*Fouling factor*)

Selama dioperasikan dengan kebanyakan cairan dan gas, terbentuk suatu lapisan kotoran pada permukaan perpindahan-panas secara berangsur-angsur. Endapan ini dapat berupa abu (*ash*), sulfur yang menempel, atau berbagai endapan lainnya yang berasal dari gas buang dan dapat menyebabkan kerak bahkan korosi. Efeknya, yang disebut pengotoran (*fouling*) dapat mempertinggi tahanan *thermal*. Tahanan *thermal* dapat ditentukan dari hubungan⁷:

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U} \quad \dots\dots\dots(2-11)$$

Keterangan :

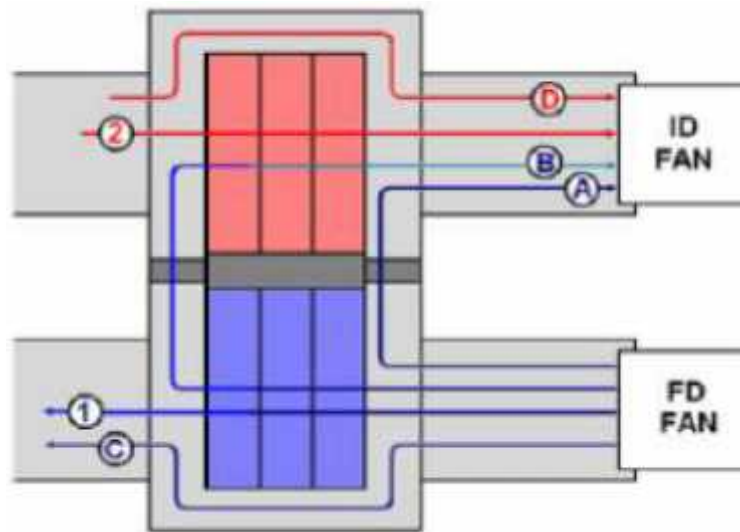
U = konduktansi satuan penukar panas bersih,

U_d = konduktansi setelah terjadinya pengotoran,

R_d = tahanan termal satuan endapan.

2.5.2. Kebocoran Udara (*Air leakage*)

Kebocoran udara atau *Air leakage* adalah berat atau jumlah udara yang ikut terbawa keluar dari sisi udara bakar (*air side*) ke sisi gas buang (*gas side*). Seluruh kebocoran diasumsikan terjadi di antara sisi udara masuk (*air inlet*) dan sisi keluar gas buang (*gas outlet*).



(Sumber : Power-Gen, 2010, hal 2)

Gambar 2.9 Jalur Aliran Kebocoran Air heater

Keterangan :

Jalur 1 : Aliran udara normal

Jalur 2 : Aliran gas buang normal

Jalur A : Udara *ambient* dari *Forced Draft Fan* (FDF) keluar (*Leaking*) secara langsung ke sisi *gas outlet air heater*.

Jalur B : Udara yang sudah dipanaskan keluar ke sisi *gas outlet air heater*.

Jalur C : Udara *ambient* dari *FD fan* mengalami kebocoran di sekeliling *air heater*.

Jalur D : Gas buang panas keluar *boiler*.

Prosentase (%) kebocoran udara (*air leakage*) *air preheater* didefinisikan sebagai 100 dikalikan massa udara basah yang bocor ke sisi gas buang (*gas side*)

⁷ F. Kreith, *op. cit.*, hal 571

dibagi dengan massa gas basah memasuki pemanas udara (*air side*). Perhitungan ubungan empiris menggunakan perubahan konsentrasi O₂ dalam gas buang.

Persamaan kebocoran udara dapat ditentukan dengan hubungan⁸ :

$$leakage \% = \frac{O_{2out} - O_{2in}}{21 - O_{2out}} \times 0,9 \times 100 \% \dots\dots(2-12)$$

Keterangan :

AL = *Air heater Leakage* (%)

O_{2out} = Prosentase keluar *air heater* (%)

O_{2in} = Prosentase masuk *air heater* (%)

21 = Kadar oksigen pada udara normal (%)

0,9 = faktor

2.5.2.1 Kebocoran *Circumferential Seal*

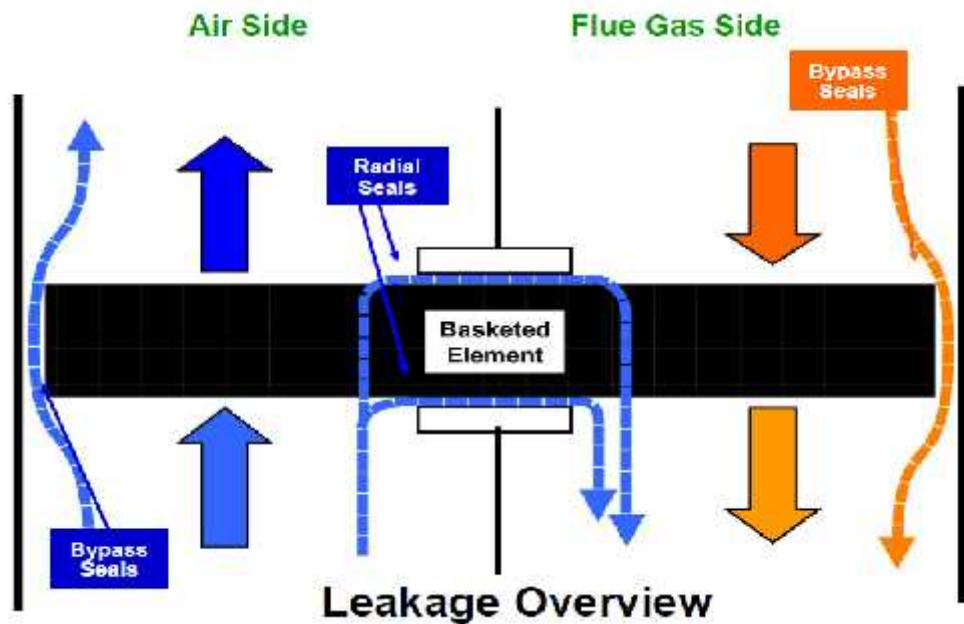
Circumferential seal adalah *sealing* yang terletak di seluruh bagian yang mengelilingi (*circumference*) rotor dari *air heater*, pada kedua *hot end* dan *cold end* dari *air heater*. Pada sisi *flue gas* dari *air heater*, semua kebocoran (*Leakage*) yang melewati celah di sekitar sisi *circumferential seal* pada *air heater* (melewati elemen perpindahan panas) dan keluar melalui hilir *circumferential seals*. Hasil dari kebocoran ini menyebabkan hilangnya *transfer enthalpi* ke *element bundle*, dan menyebabkan naiknya temperatur (serta *actual volume*) pada *flue gas* yang memasuki *Induced Draft Fan s*. Sisi *air side* pada *air heater* volume kebocoran (*Leakage*) yang melewati *first set* pada *circumferential seals*, akan memasuki *annulus* di sekeliling rotor, di mana *Leakage* akan terpecah/terbagi menjadi dua

arah. Volume di setiap arahnya bergantung pada *differential pressure* antara titik keluarnya. Sebagian dari aliran akan terus mengalir lurus dan keluar melalui *second set* dari *circumferential seals*. Sisa dari aliran akan diarahkan di sekeliling rotor dan keluar ke dalam aliran/saluran gas buang (melewati *axials seal*) melewati *gas side-cold end circumferential seals*.

2.5.2.2 Kebocoran Radial Seal

Radial sealing system memberikan *sealing* di antara rotor dan *sector plates* pada kedua *hot-end* dan *cold-end*. *Sealing* ini mengurangi kebocoran (*Leakage*) udara yang digunakan untuk pembakaran dan ikut keluar bersama gas buang pada *gas side*. Kebocoran yang terjadi dari *air side* ke *gas side* pada *air preheater* melewati/melalui sela-sela di antara rotor dan *sector plate* pada arah *radial*. Ketika rotor berputar, *radial seal* ini bekerja dengan permukaan *sector plate* untuk menahan aliran yang terjadi pada *air side to gas side*. Kebocoran pada *radial seal* dinyatakan sebagai sebuah presentase. Pada dasarnya merupakan presentase suatu aliran gas (*gas flow*) dari *air heater* yang merupakan hasil dari massa udara masuk yang mengalami kebocoran(*leaks*) dan melewati *air heater seals* dalam aliran *gas outlet*.

⁸ Anonim, Indonesia Indramayu Power Plant 3x330 MW APH O&M Manual, Howden Hua Engineering Co.Ltd., 2008, hal. 62.



(Sumber : W.A Mahatma 2013, Undip hal 29)

Gambar 2.10 Kebocoran *Circumferential* dan *Radial*

2.5.3. *Pressure drop*

Pressure drop adalah penurunan tekanan yang terjadi dalam *heat exchanger* apabila suatu fluida melaluinya. *Pressure drop* merupakan parameter penting dalam desain alat penukar panas. Penurunan tekanan ini semakin besar dengan bertambahnya *fouling factor* pada *heat exchanger* karena usia penggunaan alat terlalu lama. Dalam pemanas udara tipe *rotary*, penurunan tekanan pada sisi gas (*gas side*) dan sisi udara (*air side*) muncul dari hambatan (gesek) terhadap aliran masuk dan keluar⁹.

$$\text{Pressure drop} = P_{g1} - P_{g2} \dots\dots\dots(2-13)$$

Keterangan :

⁹ Ibid, hal. 62.

Pressure drop : Penurunan tekanan selama melewati *air preheater* (Pa)

P_{g1} : Tekanan gas pada sisi masuk *air preheater* (Pa)

P_{g2} : Tekanan gas pada sisi keluar *air preheater* (Pa)

2.6. Efisiensi Air Heater

Pada analisa ini perhitungan pada efisiensi memindahkan panas dari sisi *flue gas* menuju udara primer dan sekunder sehingga mengetahui berapa efisiensi perpindahan panas tersebut, karena pada proses perpindahan panas terjadi kebocoran pada *air heater* karena *radial seal* atau *axial seal* korosi dan berlubang sehingga mengakibatkan mengurangi efisiensi *air heater* dan efisiensi pada *air heater* sisi *flue gas* ditentukan dengan:

- a. Kalkulasi kebocoran udara¹⁰ :

$$leakage \% = \frac{O_{2out} - O_{2in}}{21 - O_{2out}} \times 0,9 \times 100 \% \dots\dots\dots(2-14)$$

Keterangan :

AL = *Air heater Leakage* (%)

O_{2out} = Prosentase keluar *air heater* (%)

O_{2in} = Prosentase masuk *air heater* (%)

- b. Temperatur gas keluar terkoreksi tanpa kebocoran di *air heater*¹¹

$$tg_{2NL} = \frac{AL}{100} \times tg_2 - ta_1 + tg_2 \dots\dots\dots(2-15)$$

di mana :

¹⁰ Ibid

¹¹ Ibid

t_{g2NL} : Temperatur gas keluar *air preheater* dengan koreksi pada kondisi tidak ada kebocoran udara ($^{\circ}\text{C}$)

AL : Air Leakage (%)

t_{g2} : Temperatur gas keluar APH ($^{\circ}\text{C}$)

ta_1 : Temperatur udara rata-rata masuk APH ($^{\circ}\text{C}$)

c. Efisiensi *Thermal air heater*¹²

$$\eta = \frac{t_{g1} - t_{g2NL}}{t_{g1} - ta_1} \times 100 \% \dots\dots\dots(2-16)$$

Keterangan :

η : Efisiensi termal sisi gas buang (%)

t_{g1} : Temperatur gas masuk APH ($^{\circ}\text{C}$)

t_{g2NL} : Temperatur gas keluar *air preheater* dengan koreksi pada kondisi tidak ada kebocoran udara ($^{\circ}\text{C}$)

ta_1 : Temperatur udara rata-rata masuk APH ($^{\circ}\text{C}$)

¹² Ibid