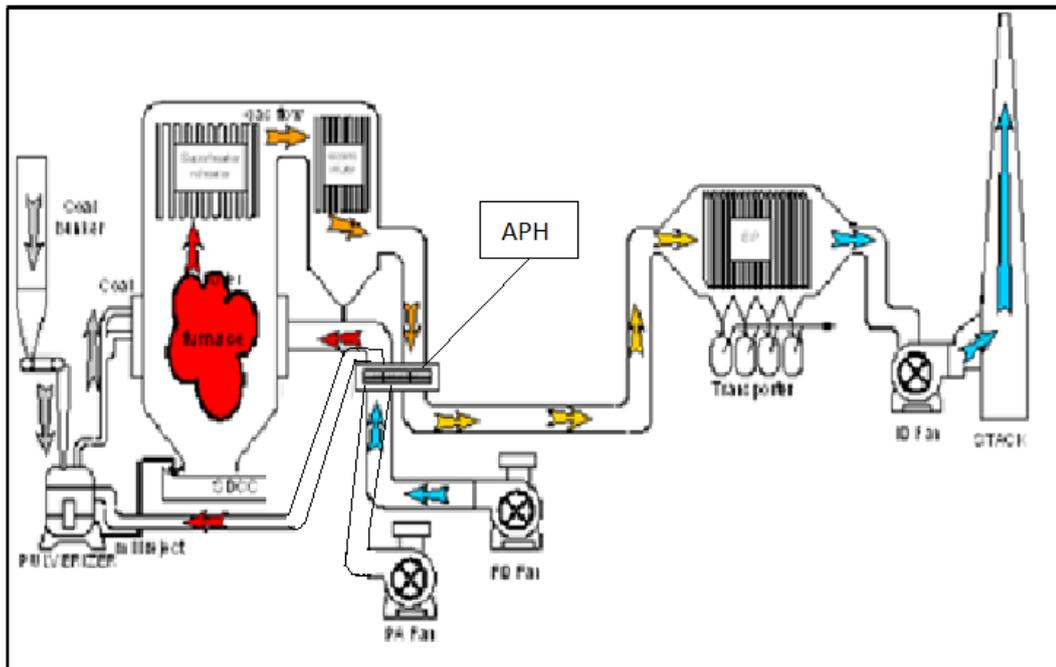


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Skema Sistem Udara Pembakaran dan Gas Buang

Sistem udara pembakaran dan gas buang adalah sebuah sistem yang menangani pasokan udara untuk kebutuhan pembakaran pada boiler dan juga menangani gas sisa pembakaran yang dihasilkan oleh pembakaran pada boiler agar tidak mencemari lingkungan. Sistem udara pembakaran dan gas buang harus berjalan dengan baik karena bahan bakar yang digunakan pada PLTU 1 Jawa Barat Indramayu adalah bahan bakar batu bara yang mana tingkat pencemarannya cukup tinggi. Skema sistem udara pembakaran dan gas buang terdapat pada gambar 2.1.



Sumber: Drawing PLTU Suralaya

Gambar 2.1. Skema sistem udara pembakaran dan gas buang

Sistem udara pembakaran dimulai dari penghisapan udara dari atmosfer menggunakan *fan*, lalu dialirkan menuju ke boiler, sebelum masuk ke dalam boiler udara terlebih dahulu dipanaskan dengan alat penukar kalor atau yang biasa disebut dengan *air preheater*. Pemanasan tersebut memanfaatkan panas yang ada pada gas buang hasil pembakaran. Pemanfaatan panas itu juga berguna untuk meningkatkan efisiensi boiler.

Udara yang digunakan dalam sistem udara pembakaran dibagi menjadi dua, yaitu udara primer dan sekunder. Perbandingan antara udara primer dan sekunder untuk suplai udara pembakaran adalah 30% udara primer dan 70% udara sekunder. Udara primer didapat dari udara atmosfer yang dihisap oleh *primary air fan* (PA Fan) setelah sebelumnya melalui filter udara. Udara ini kemudian dipanaskan pada *primary air preheater* dengan memanfaatkan gas panas setelah melewati *reheater* dan *economizer* agar udara yang masuk pada boiler sudah mempunyai suhu yang cukup tinggi dan dapat meningkatkan efisiensi boiler. Udara ini kemudian disalurkan ke penggiling batubara (*mill pulverizer*). Udara panas ini akan memanaskan batubara, lalu akan membawa batubara yang sudah dihancurkan menjadi serbuk sebesar 200 mesh menuju ke burner pada boiler.

Udara sekunder dihisap dengan kipas tekan paksa (*Forced Draft Fan*) setelah sebelumnya juga melalui filter udara. Setelah melewati *FD Fan* udara juga kemudian menuju ke *air preheater* untuk dipanaskan lagi dengan memanfaatkan gas pembakaran setelah melewati *reheater* dan *economizer*. Tujuan pemanasan ini adalah udara dibuat cukup panas (kurang lebih 350°C) sehingga memudahkan proses pembakaran. Dari pemanasan ini udara sekunder dialirkan ke *wind box* yang dihubungkan ke lubang udara pembakaran pada burner. Fungsi udara ini selain

sebagai pensuplai udara pembakaran juga sebagai pendingin bagian-bagian pembakar (*firing system*) agar tidak rusak karena panas radiasi yang disebabkan oleh panas pancaran api.

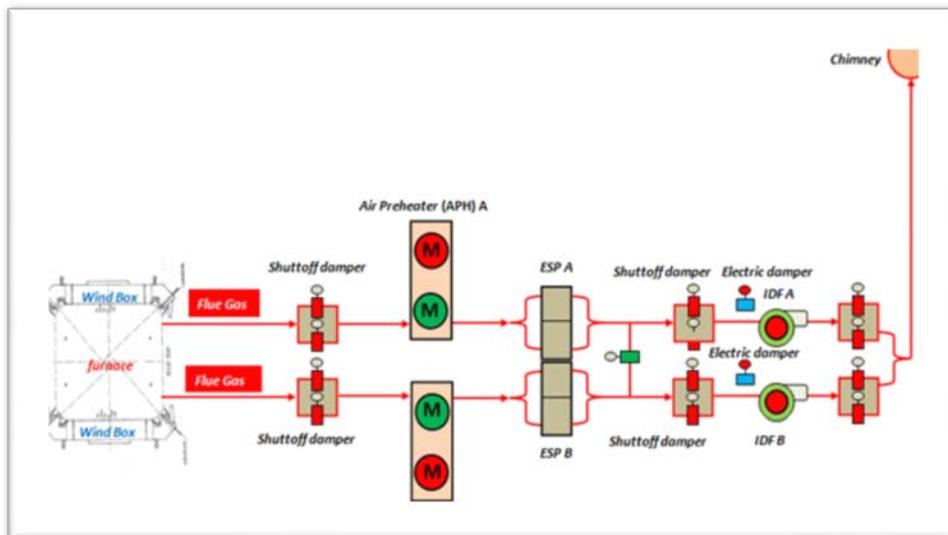
Proses pembakaran akan terjadi di dalam boiler karena pencampuran antara bahan bakar (bisa HSD ataupun batu bara), udara pembakaran, serta sumber panas. Gas hasil pembakaran inilah yang digunakan untuk memanaskan air umpan sampai menjadi uap dengan suhu dan tekanan tinggi. Setelah digunakan untuk proses pemanasan air, gas hasil pembakaran tidak serta merta dibuang ke atmosfer. Gas sisa hasil pembakaran ini akan melalui sistem gas buang terlebih dahulu agar gas sisa pembakaran tetap aman bagi lingkungan. Spesifikasi boiler yang digunakan di PLTU 1 Jawa Barat Indramayu terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Spesifikasi Boiler

<i>Manufactur</i>	<i>Babcock &amp; Wilcox Beijing Company (China)</i>
<i>SH steam flow (t/h)</i>	<i>1050</i>
<i>SH steam pressure at outlet (MPa,g)</i>	<i>18.44</i>
<i>SH steam temperature at outlet (°C)</i>	<i>543</i>
<i>RH steam flow(t/h)</i>	<i>929.4</i>
<i>RH pressure at inlet (MPa,g)</i>	<i>4.425</i>
<i>RH pressure at outlet(MPa,g)</i>	<i>4.235</i>
<i>RH temperature at inlet (°C)</i>	<i>344</i>
<i>RH temperature at outlet (°C)</i>	<i>543</i>

<i>Feeder water temperature (°C)</i>	258
<i>Boiler calculating efficiency (HHV basic)</i>	86.05%
<i>Boiler calculating efficiency (LHV basic)</i>	93.11%

Sistem gas buang adalah sistem yang menangani segala komponen udara hasil pembakaran dari *furnace* ke atmosfer dan sekaligus menjaga agar sisa pembakaran PLTU tidak menyebabkan polusi berlebihan kepada lingkungan. Skema sistem gas buang bisa dilihat pada gambar 2.2. Bagian dari *flue gas system* yang umum terdapat di semua PLTU adalah *Electrostatic Precipitator (ESP)*, *air preheater*, dan *Induced Draft Fan (IDFan)*.



Sumber : Drawing PLTU 1 Jawa Barat Indramayu

Gambar 2.2. Skema sistem gas buang

Gas buang dari sisa pembakaran di dalam furnace akan dimanfaatkan panasnya untuk memanaskan *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air preheater*. Udara yang keluar dari *economizer* akan keluar menuju ke *air preheater* sebelum masuk ke ESP. Di ESP udara disaring debunya sebelum keluar

di udara bebas. Dari ESP udara dihisap oleh IDF untuk selanjutnya akan disalurkan ke *chimney* (cerobong).

## **2.2. Perpindahan Panas**

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut. Perpindahan panas dari suatu zat ke zat lain seringkali terjadi dalam kehidupan sehari-hari baik penyerapan atau pelepasan kalor.

Kalor 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 ke dua.

Kalor atau panas 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. Radiasi**

Radiasi adalah proses perpindahan panas di mana panas dipindahkan melalui pancaran, jadi panas dari benda dapat mengalir dari benda dengan suhu tinggi ke benda dengan suhu rendah bila benda-benda tersebut terpisah di dalam ruang, bahkan bila terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut. Istilah radiasi pada umumnya digunakan dalam segala jenis gelombang elektromagnetik,

tetapi dalam ilmu perpindahan panas kita hanya perlu memperhatikan hal yang diakibatkan oleh suhu dan yang dapat mengangkut energi melalui medium yang tembus cahaya atau melalui ruang. Energi yang berpindah dengan cara ini diistilahkan dengan panas radiasi. Dalam soal-soal teknik yang menyangkut suhu yang mendekati suhu atmosfer, perpindahan panas dengan cara radiasi sering kali diabaikan. Laju perpindahan panas radiasi dapat dihitung dengan rumus berikut ini<sup>1</sup>.

$$q_r = \sigma A \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-1)$$

di mana :

$q_r$  = laju perpindahan panas radiasi (Btu/h)

$\sigma$  = konstanta dimensional  $0,1714 \cdot 10^{-8}$  (Btu/h ft<sup>2</sup> R<sup>4</sup>)

$A$  = luas permukaan (ft<sup>2</sup>)

$\epsilon$  = emitansi

$T$  = suhu permukaan (R)

### 2.2.2. Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas di mana panas mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Menurut teori kinetik, suhu elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul-molekul yang membentuk

---

<sup>1</sup> Frank Kreith, Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas, edisi ketiga, Erlangga, Jakarta 1991, hal. 11

elemen itu. Energi yang dimiliki oleh elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan dan posisi relatif molekul-molekulnya disebut dengan energi dalam. Bila molekul-molekul di suatu daerah memperoleh energi kinetik rata-rata yang lebih besar daripada yang dimiliki oleh molekul-molekul di daerah yang berdekatan, maka molekul-molekul yang memiliki energi yang lebih besar itu akan memindahkan sebagian energinya kepada molekul-molekul di daerah yang bersuhu lebih rendah. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme perpindahan panas yang mana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya.

Hubungan dasar untuk perpindahan panas konduksi disusulkan oleh ilmuwan Perancis, J.B.J. Fourier pada tahun 1882. Hubungan ini menyatakan bahwa  $q_k$ , laju aliran perpindahan panas konduksi dalam suatu bahan, sama dengan persamaan berikut<sup>2</sup> :

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

di mana :

$q_k$  = laju aliran perpindahan panas konduksi (Btu/h)

$k$  = konduktivitas termal (Btu/h ft F)

$A$  = luas permukaan (ft<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  = gradien suhu pada permukaan (F/ft)

### 2.2.3. Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi antara permukaan benda padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya. Perpindahan energi yang

---

<sup>2</sup> Ibid, hal. 7

terjadi pada konveksi merupakan perpindahan energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpangan energi dan juga gerakan menyampur.

Perpindahan panas konveksi diklasifikasikan dalam konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*) menurut cara menggerakkan alirannya. Bila gerakan mencampur berlangsung semata-mata sebagai akibat dari perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh gradien suhu, maka konveksi tersebut merupakan konveksi bebas atau alamiah. Bila gerakan mencampur disebabkan oleh suatu alat dari luar, seperti pompa atau kipas, maka hal itu disebut sebagai konveksi paksa.

Laju perpindahan panas dengan cara konveksi dapat dihitung dengan hubungan<sup>3</sup> :

$$q_c = h A \Delta T \quad (2-3)$$

di mana :

$q_c$  = laju perpindahan panas konveksi (Btu/h)

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi (Btu/h ft<sup>2</sup> F)

$A$  = luas perpindahan panas (ft<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = beda antara suhu permukaan dan suhu fluida (F)

### 2.3. *Air Heater Heat Exchanger*

*Air heater* adalah salah satu alat penukar panas. Alat penukar panas adalah alat yang menghasilkan perpindahan panas dari satu fluida ke fluida lainnya.

---

<sup>3</sup> Ibid, hal. 12

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 temperatur.

*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 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*.

*Air heater* memiliki beberapa jenis atau macam yang biasa digunakan di peralatan-peralatan industri. Jenis-jenis ini dibedakan karena memang beberapa industri memiliki tujuan dan rancangan berbeda dalam memilih jenis *air heater*.

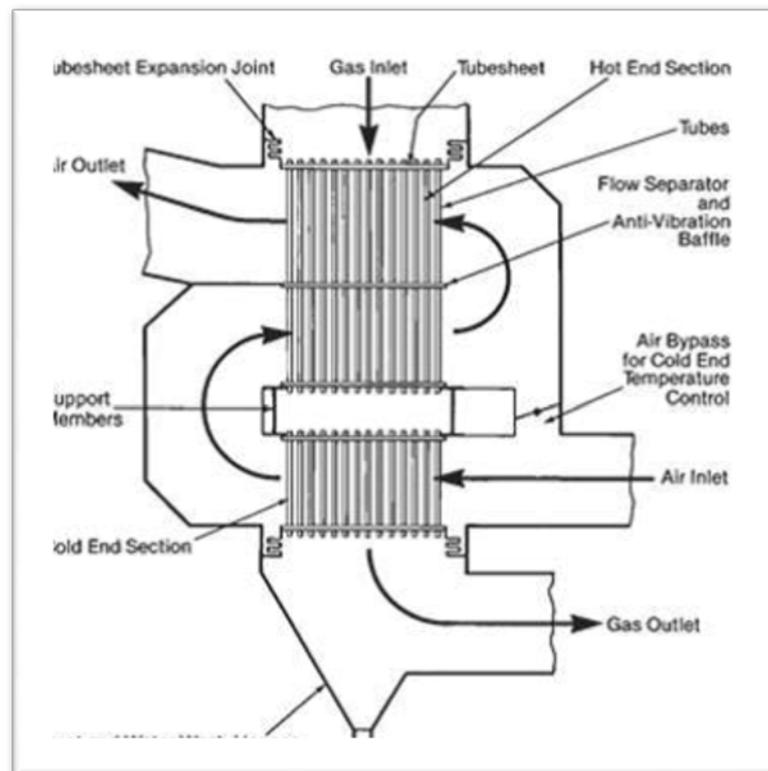
### **2.3.1. Recuperatif Air Heater**

Pada *recuperatif heat exchanger*, panas dipindahkan secara terus menerus dan langsung melalui *stationer*, permukaan perpindahan panas yang padat memisahkan aliran panas dari aliran yang dingin. Pada *recuperatif heat exchanger* biasanya pada permukaan perpindahan panas berbentuk tabung dan plat paralel.

### 2.3.1.1. Tubular Air Heater

Tubular *air heater* memiliki ciri ciri yaitu energi yang ditransfer dari panas flue gas mengalir di dalam tabung yang ber dinding tipis dan didinginkan oleh udara yang berada diluar tabung sehingga temperatur udara yang berada di luar tabung menaik.

Tubular *air heater* seperti tertampil pada gambar 2.3. memiliki ciri ciri yaitu unit tersusun dari tumpukan tabung berbentuk lurus yang menggulung atau di las kedalam lapisan tabung dan tertutup dalam *casing* baja. *Casing* berfungsi sebagai penutup udara atau gas dan memiliki lubang masuk dan lubang keluar udara dan gas.

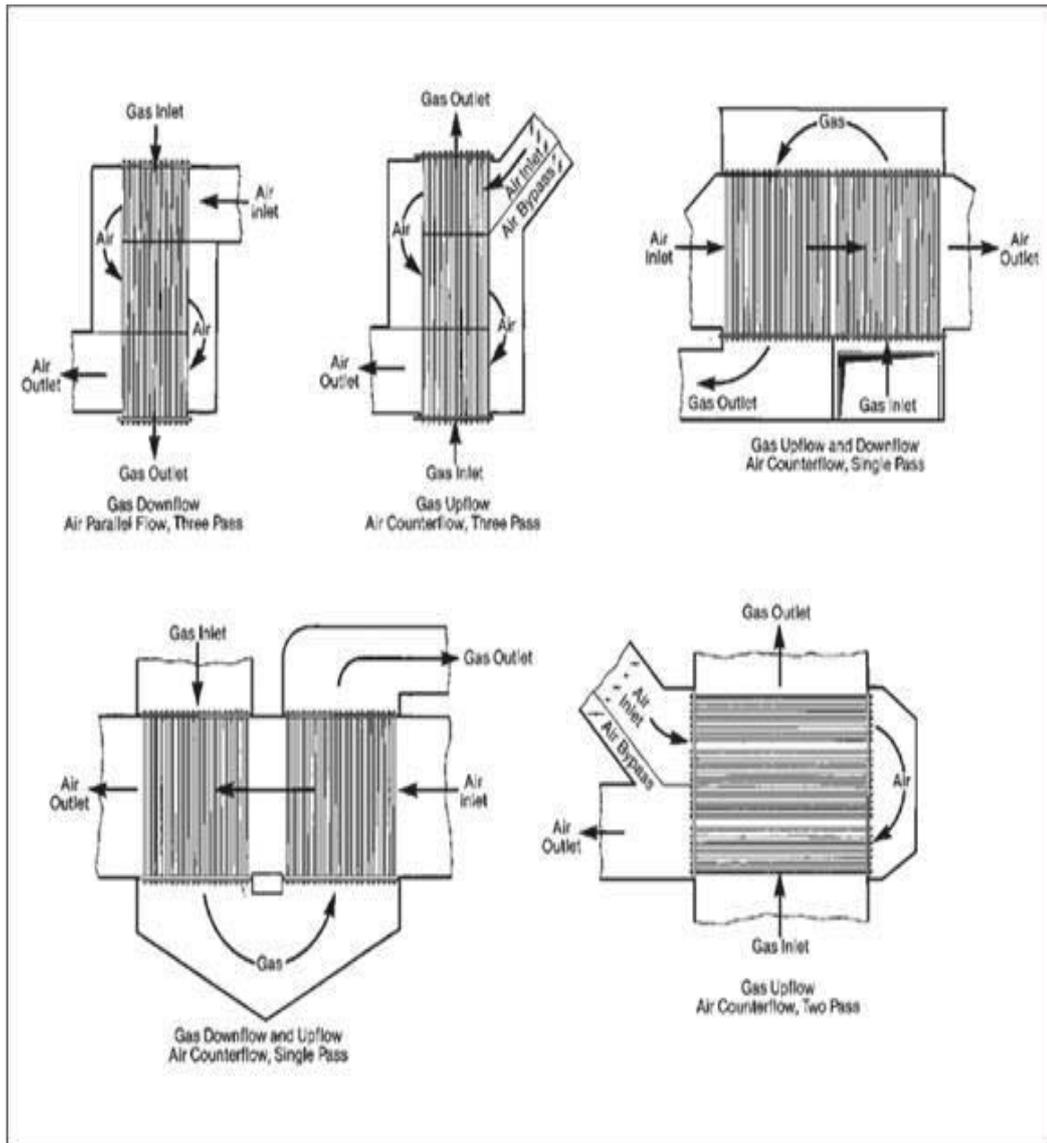


(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 12)

Gambar 2.3. Tubular air heater

Material pada *tubular air heater* biasanya adalah baja karbon atau material tabung logam tahan korosi yang digunakan dalam tabung dengan diameter yang berkisar 1,5-4 inci (38-102 mm) dan memiliki ketebalan dinding 1,24 - 3,05 mm.

*Tubular air heaters* dilengkapi dengan uap atau udara *sootblowers* untuk menghilangkan akumulasi debu dari bagian pipa gas yang terbuka selama operasi. Pengaturan aliran yang paling umum adalah *counter flow* yaitu gas naik secara *vertical* melalui tabung dan udara mengalir secara *horizontal* dalam satu atau lebih jalur di luar tabung. Satu variasi dari pengaturan jalur gas udara tunggal dan ganda digunakan untuk mengakomodasi tata ruang pembangkit. Desain biasanya mencakup perlengkapan resirkulasi pada udara dingin atau udara panas untuk mengontrol korosi dan pencemaran debu. Macam-macam variasi pengaturan udara pada *tubular air heater* tertampil pada gambar 2.4.



(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 13)

Gambar 2.4. Macam-macam variasi pengaturan udara *tubular air heater*

### 2.3.1.2. Cast Iron Air Heater

*Cast iron air heater* kebanyakan digunakan untuk industri petrokimia, namun ada juga yang digunakan pada unit utilitas listrik. Besi cor digunakan karena ketahanannya terhadap korosi sangat bagus. Pembagian tabung secara membujur dirakit dari dua pelat besi cor dan tabung tunggal yang dirakit ke dalam bagian pemanas udara seperti *split tubes*. *Air heaters* biasanya diatur untuk sebuah

jalur gas tunggal dan jalur udara ganda bersama dengan aliran udara di dalam tabung.

### **2.3.1.3. Plate Air Heater**

*Plate air heaters* memindahkan panas dari aliran gas panas yang berada di salah satu sisi plat ke aliran udara dingin di sisi yang berlawanan, biasanya dalam aliran silang dan juga elemen pemanas terdiri dari tumpukan pelat paralel. *Plate air heaters* adalah beberapa jenis pertama yang digunakan, tetapi penggunaannya menurun karena masalah *seal plate*.

### **2.3.1.4. Steam Coil Air Heater**

*Steam coil and water coil re-cuperative air heater* adalah pemanas udara secara luas digunakan dalam utilitas pembangkit uap untuk memanaskan udara pembakaran. Udara pemanasan mengurangi potensi korosi dan penyumbatan pada *cold end* dalam *air heater* utama. *Steam coil air heater* terkadang berfungsi sebagai satu-satunya sumber udara pembakaran sebelum pemanasan. Pemanas ini terdiri dari tumpukan tumpukan diameter kecil tabung bersirip eksternal yang diatur *horizontal* atau *vertikal* di pipa antara *combustion air fan* dan *air heater* utama. Udara pembakaran yang melewati aliran silang di luar tabung, dipanaskan oleh uap ekstraksi turbin atau *feedwater* yang mengalir di dalam tabung. *Glikol etilena* terkadang digunakan sebagai fluida panas untuk mencegah kerusakan.

### **2.3.2. Regeneratif Air Heater**

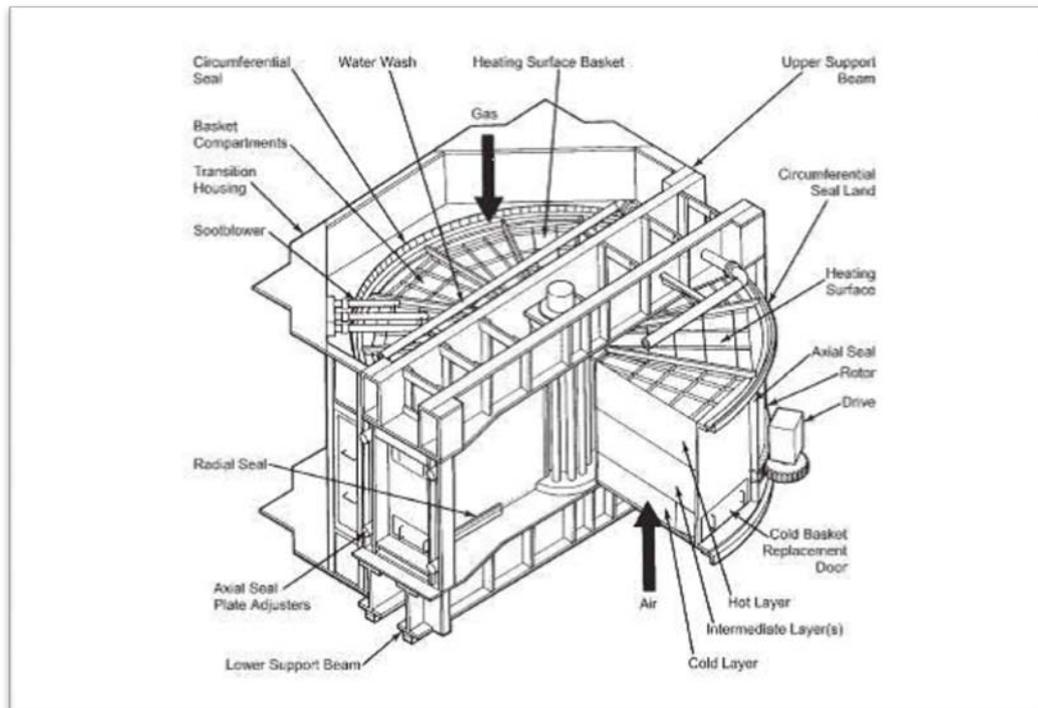
*Regeneratif air heaters* mentransfer panas secara tidak langsung dengan konveksi sebagai media penyimpanan panas secara berkala untuk bagian panas dan dingin oleh putaran atau pergantian katup. Pada pembangkit listrik tenaga

uap, rangkaian lempengan besi bergelombang yang rapat berfungsi sebagai media penyimpanan. Dalam unit ini baik pelat baja atau elemen permukaan berputar melalui udara dan aliran gas atau berputar melalui saluran udara langsung dan uap gas melalui elemen permukaan statis.

*Regeneratif air heaters* relatif padat dan merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk pemanasan udara pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap. Karakteristiknya operasi yang paling signifikan yaitu kebocoran udara ke dalam aliran gas dikarenakan operasi putaran.

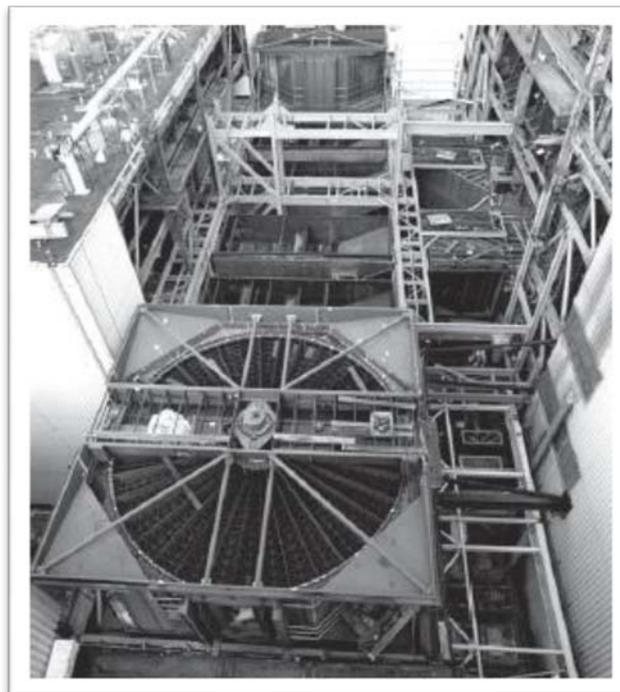
#### **2.3.2.1. *Ljungstrom Air Heater***

*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. 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*. Untuk lebih jelasnya mengenai *Ljungstrom air heater* dapat dilihat pada gambar 2.5. dan gambar 2.6.



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

Gambar 2.5. Komponen-komponen *Ljungstrom air heater*

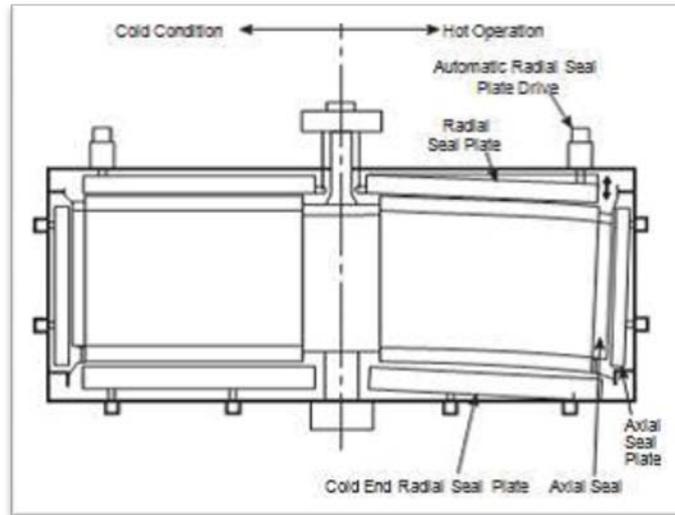


(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 16)

Gambar 2.6. Bentuk nyata *Ljungstrom air heater*

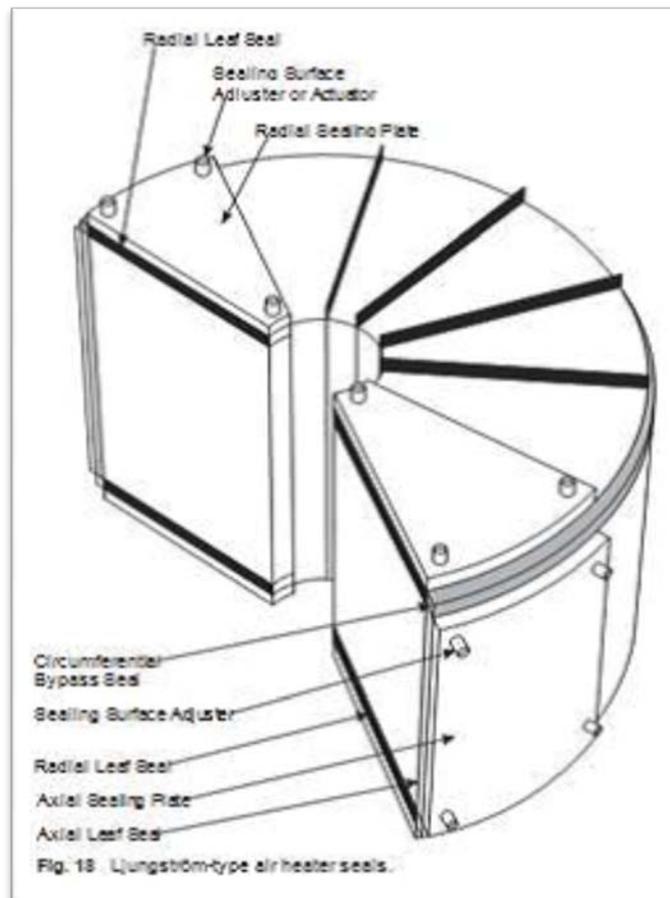
Pengaturan aliran yang paling umum adalah aliran *counter flow* yaitu gas panas yang memasuki bagian atas *rotor* dan udara dingin memasuki bagian bawah *rotor*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Pemanas yang menggunakan skema aliran ini diidentifikasi sebagai *hot end on top* dan *cold end on bottom*. 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.

Perangkat *sootblowing* di *outlet gas* juga harus digunakan untuk mengarahkan *superheated steam* atau udara kering melalui *nozzles* ke dalam elemen-elemen pemanasan permukaan *rotor*. Perangkat *sootblow* ini digunakan agar secara berkala dapat membersihkan *rotor* dari akumulasi residu bahan bakar selama operasi. Selain harus ada perangkat *sootblow* harus dipasang juga seal-seal untuk mencegah kebocoran sehingga dapat bercampur antara udara dan gas buang. Untuk lebih jelasnya mengenai seal dapat terlihat pada gambar 2.7 dan gambar 2.8.



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

Gambar 2.7. Penampang samping *Ljungstrom* air heater

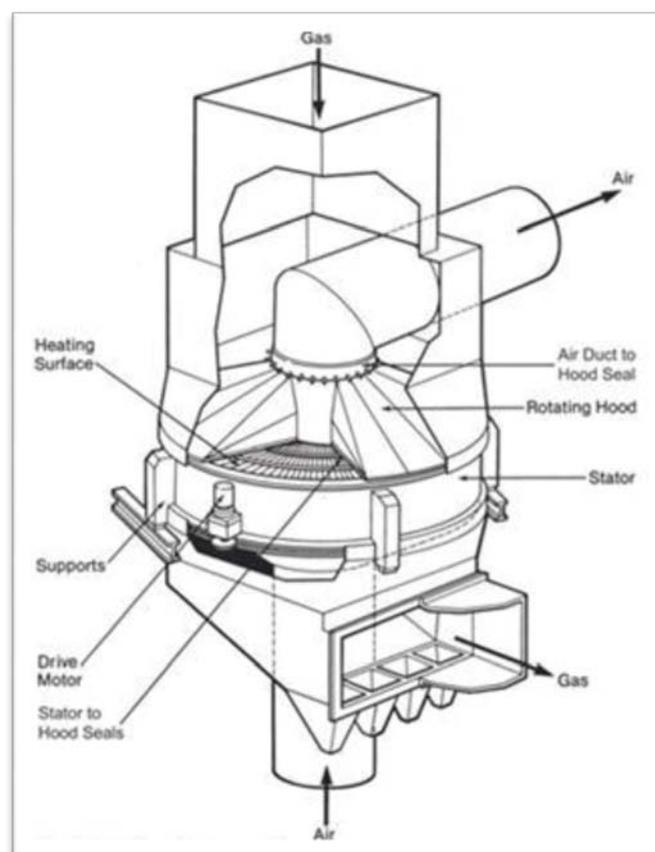


(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 17)

Gambar 2.8. Penampang diagonal rotor *Ljungstrom* air heater

### 2.3.2.2. *Rothemuhle Air Heater*

*Rothemühle air heater* adalah jenis *regeneratif air heater* yang menggunakan unsur-unsur permukaan *stasioner* dan saluran yang berputar (Gbr. 20). 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*. *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. Untuk lebih jelasnya *air heater rothemuhle* dapat dilihat pada gambar 2.9.



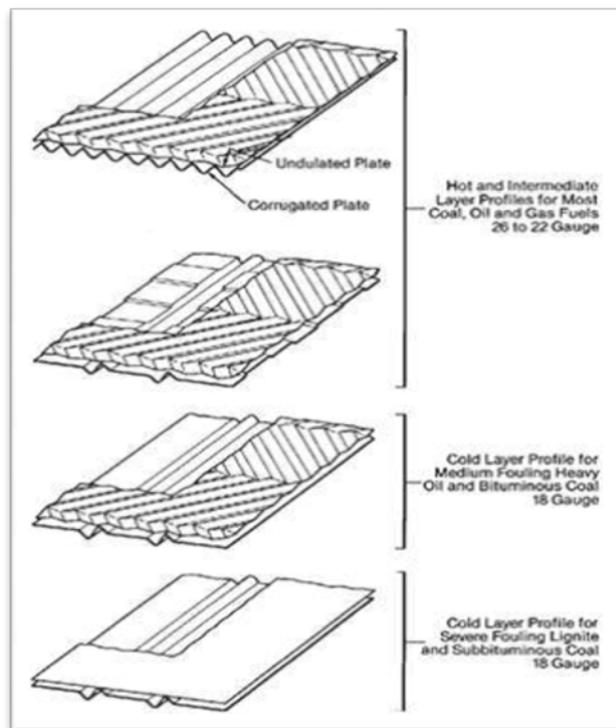
(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 18)

Gambar 2.9. *Air Heater Rothemuhle*

### 2.3.2.3. *Regenerative Heating Surface*

*Regenerative heating surface* adalah pengaturan dua pelat logam yang tersusun rapat dibentuk khusus. Setiap satu pasang elemen terdiri dari kombinasi penampang datar, bergelombang atau berombak. Gulungan lipatan dan berombak berfungsi memisahkan *plates* untuk mengatur jalur aliran, meningkatkan luas permukaan pemanasan dan memaksimalkan perpindahan panas dengan menciptakan aliran turbulensi. Pelat baja, 26-18 ukuran tebal, biasanya berjarak 0,2 sampai 0,4 inci (5 sampai 10 mm) per bagian.

Permukaan di elemen ditumpuk dan dirangkai kedalam masing-masing *baskets* dan di pasang ke *rotor air heater* dan *stators* dalam dua lapisan atau lebih. Lapisan permukaan pada *inlet air heater*, yang ditandai adanya *cold layer*, dibedakan dengan lapisan lain pada desainnya. Biasanya pada bagian *cold layer* sering terjadi korosi dan *fouling* abu. Biasanya pada *cold layer* memiliki ketebalan 12 inci (305 mm) agar lebih ekonomis dari segi biaya pemasangan kembali. elemen penampang yang terbuka dimaksudkan agar tahan korosi dan bersih. Hampir semua elemen *cold layer* adalah logam campuran yang mudah berkarat dan ada potensi korosi yang tinggi dan pada porselin baja *cold layer* dilapisi enamel. Lapisan *hot and intermediate layers* lebih padat dari *cold layer* yang menggunakan lempengan tipis. Gambar 2.10. menggambarkan beberapa penampang elemen permukaan pemanas dan pengaturan permukaan *air heater*.



(Sumber : Ahmad Sutopo, 2013, hal. 20)

Gambar 2.10. Profil elemen pemanas pada regenerative *air heater*

#### 2.4. Laju perpindahan panas keseluruhan

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 ini<sup>4</sup> :

$$q = U \times A \times \Delta T_{lm} \quad (2-4)$$

<sup>4</sup> Ibid, hal. 555

di mana :

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

$U$  = Koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = Luas area perpindahan panas keseluruhan (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{lm}$  = 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<sup>5</sup> :

$$q = \dot{m}_h c_{p h} \Delta T_h = \dot{m}_c c_{p c} \Delta T_c \quad (2-5)$$

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)

$\Delta T_h$  = Selisih temperatur sisi panas (°C)

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

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

$\Delta T_c$  = Selisih temperatur sisi dingin (°C)

## 2.5. *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*

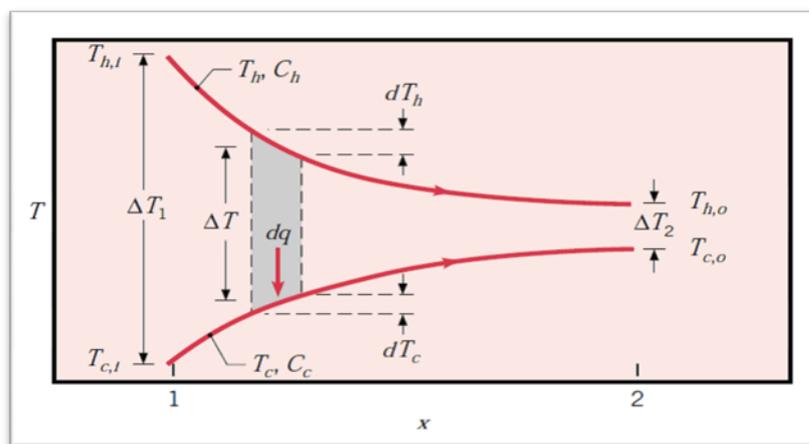
Nilai LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*) adalah nilai yang berkaitan dengan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin

---

<sup>5</sup> Ibid, hal. 555

penukar panas. Dengan asumsi bahwa aliran pendingin mengalir dalam kondisi tunak (*steady state*), tidak ada kehilangan panas secara keseluruhan, tidak ada perubahan fase pendingin. Mencari nilai LMTD dapat dilakukan dengan rumus berikut ini dan dijelaskan juga dengan gambar 2.11 dan gambar 2.12. nilai LMTD dapat dihitung dengan persamaan <sup>6</sup>:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left[ \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right]} \quad (2-6)$$



(Sumber : Incropera F. P.,2007, hal. 677)

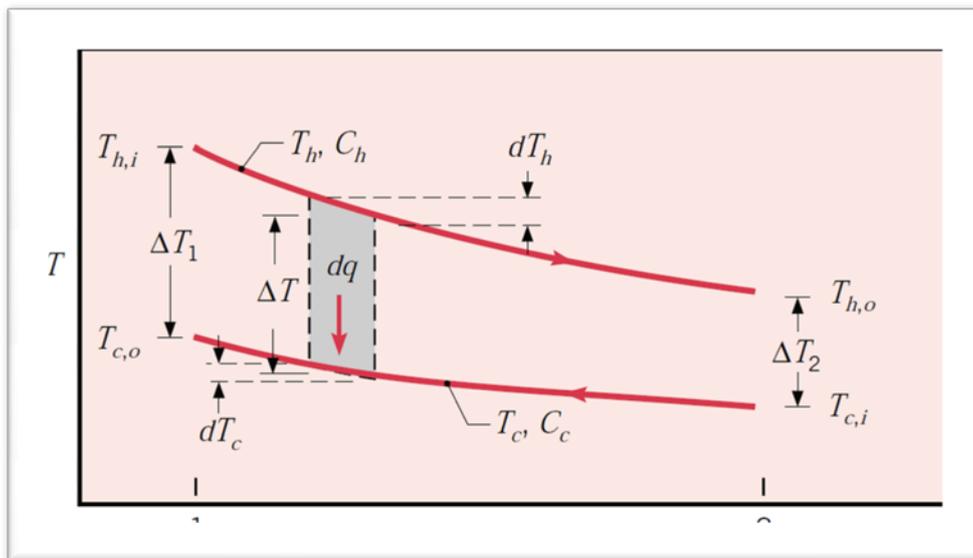
Gambar 2.11. Distribusi temperatur untuk penukar kalor aliran paralel

Untuk penukar kalor aliran paralel berlaku rumus-rumus berikut ini <sup>7</sup>:

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{h i} - T_{c i} \\ \Delta T_2 = T_{h o} - T_{c o} \end{cases} \quad (2-7)$$

<sup>6</sup> Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, Fundamental of Heat and Mass Transfer, Sixth Edition, Singapore, 2007, hal 678.

<sup>7</sup> Ibid, hal. 678.



(Sumber : Incropera F. P., 2007, hal. 679)

Gambar 2.12. Distribusi temperatur untuk penukar kalor aliran lawan (counter flow)

Untuk penukar kalor aliran lawan (counter flow) berlaku rumus-rumus berikut ini<sup>8</sup> :

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \end{cases} \quad (2-8)$$

## 2.6. 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

<sup>8</sup> Ibid, hal. 679.

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 persamaan <sup>9</sup>:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c}} \quad (2-9)$$

di mana :

$U$  = koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m<sup>2</sup>K)

$h_h$  = koefisien perpindahan panas konveksi pada sisi panas (W/m<sup>2</sup>K)

$h_c$  = koefisien perpindahan panas konveksi pada sisi dingin (W/m<sup>2</sup>K)

Dalam kaitannya dengan pengujian unjuk kerja alat penukar kalor, nilai laju alir perpindahan panas, luas area perpindahan panas, serta perbedaan suhu yang terjadi bisa saja sudah diketahui sehingga mencari nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat pula dihitung dengan menggunakan persamaan (2-4) :

$$U = \frac{q}{A \times \Delta T_{lm}}$$

---

<sup>9</sup> Kern, D. Q., Process Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Co., 1950, hal. 121.

## 2.7. Faktor pengotoran

Unjuk kerja alat penukar panas dalam kondisi pengoperasian, terutama pada industri proses seringkali tidak dapat diramalkan hanya dengan melihat analisa suhu saja. Selama pengoperasian, alat penukar panas dilewati oleh fluida-fluida yang bisa saja dapat menimbulkan kerak ataupun endapan lainnya. Efek dari hal tersebut adalah terjadinya *fouling* (pengotoran) yaitu hal yang dapat menambah nilai tahanan termal. Vendor produsen alat penukar kalor pun tidak dapat menjamin hal yang berkaitan dengan hal yang berkaitan dengan hal pengotoran ini karena sangat berpengaruh dengan cara pengoperasian, sehingga vendor biasanya hanya menjamin performa alat pada kondisi bersih. Tahanan termal bisa dihitung dengan menganalisa hasil-hasil pengujian nyata dari waktu ke waktu. Faktor pengotoran ini bisa didapat dari persamaan <sup>10</sup>:

$$R_d = \frac{1}{U_a} - \frac{1}{U} \quad (2-10)$$

di mana:

$R_d$  = faktor pengotoran / tahanan termal endapan ( $m^2K/W$ )

$U_a$  = koefisien perpindahan panas nyata setelah terjadi pengotoran ( $W/m^2K$ )

$U$  = koefisien perpindahan kondisi bersih ( $W/m^2K$ )

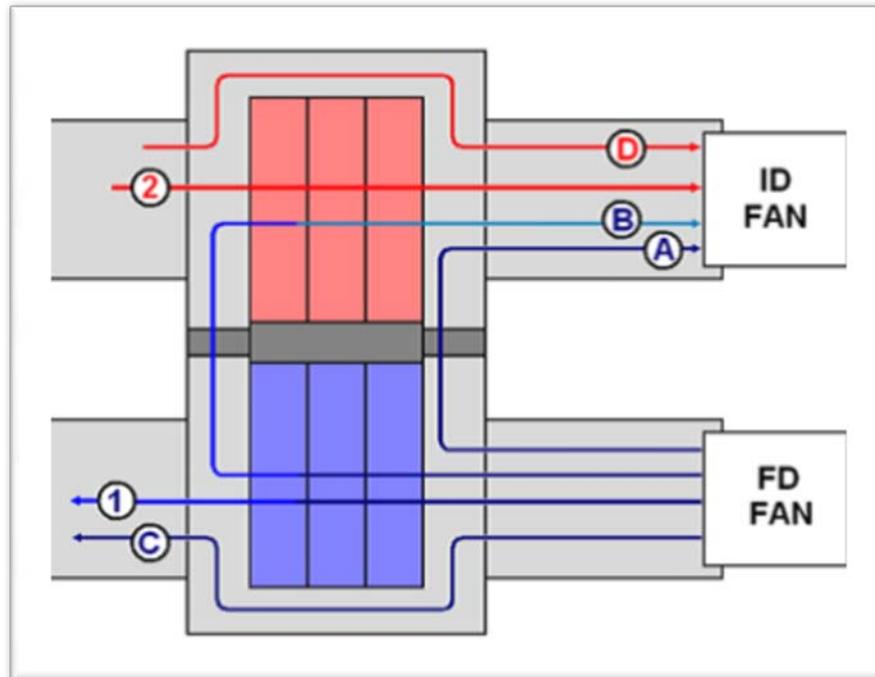
## 2.8. Kebocoran udara

Kebocoran udara atau *Air leakage* adalah berat atau jumlah udara pembakaran yang ikut terbawa keluar dari sisi udara bakar (*air side*) ke sisi gas

---

<sup>10</sup> Frank Kreith, Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas, edisi ketiga, Erlangga, Jakarta 1991, hal. 571.

buang (*gas side*). Seluruh kebocoran diasumsikan terjadi di antara sisi udara masuk (*air inlet*) dan sisi keluar gas buang (*gas outlet*). Ilustrasi kebocoran yang terjadi pada *air heater* dapat dilihat pada gambar 2.13.



(Sumber : Wahyu A. Mahatma, 2013, hal 29)

Gambar 2.13. Kebocoran di *air heater*

di mana :

- 1 = aliran udara normal
- 2 = aliran gas buang normal
- A = udara keluar bersama gas buang sebelum masuk elemen pemanas
- B = udara keluar bersama gas buang setelah melewati elemen pemanas
- C = udara ter-*bypass* tanpa melalui elemen pemanas
- D = gas buang ter-*bypass* tanpa melalui elemen pemanas

Kebocoran udara yang terjadi pada *air heater* dapat dihitung dengan membandingkan nilai presentase oksigen yang terkandung pada gas buang pada sisi masuk *air heater* dan juga presentase oksigen gas buang pada sisi keluar dari *air heater* dengan persamaan berikut ini <sup>11</sup>:

$$AL = \frac{O_{2\ out} - O_{2\ in}}{21 - O_{2\ out}} \times 0,9 \times 100\% \quad (2-11)$$

Di mana :

AL = Air Leakage (%)

$O_{2\ out}$  = kadar oksigen pada gas buang setelah melewati APH (%)

$O_{2\ in}$  = kadar oksigen pada gas buang sebelum melewati APH (%)

21 = kadar oksigen pada udara normal (%)

0,9 = Faktor

## 2.9. *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

---

<sup>11</sup> Anonim, Indonesia Indramayu Power Plant 3x330 MW APH O&M Manual, Howden Hua Engineering Co.Ltd., 2008, hal. 62.

aliran masuk dan keluar. Nilai *pressure drop* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan<sup>12</sup>:

$$Pressure\ drop = Pg_1 - Pg_2 \quad (2-12)$$

Keterangan

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

$Pg_1$  : Tekanan gas pada sisi masuk *air preheater* (Pa)

$Pg_2$  : Tekanan gas pada sisi keluar *air preheater* (Pa)

## 2.10. *Undiluted Gas Exit Temperature*

Nilai *undiluted gas exit temperature* adalah nilai temperatur gas keluar dari *air heater* yang sudah terkoreksi pada kondisi tanpa adanya kebocoran. Nilai ini perlu dicari dalam kaitannya digunakan untuk analisa termal performa *air heater* karena rata-rata dalam pengoperasian *air heater* tetap terjadi kebocoran meskipun sedikit yang dapat mempengaruhi suhu keluar gas buang. Nilai *undiluted gas exit temperature* dapat didapatkan dari persamaan<sup>13</sup>:

$$tg_{2NL} = \frac{AL}{100} \times (tg_2 - ta_1) + tg_2 \quad (2-13)$$

di mana :

$tg_{2NL}$  : Temperatur gas keluar *air preheater* dengan koreksi pada kondisi tidak ada kebocoran udara (°C)

---

<sup>12</sup> Ibid, hal. 64.

<sup>13</sup> Ibid, hal. 63

- $AL$  : Air Leakage (%)
- $tg_2$  : Temperatur gas keluar APH ( $^{\circ}C$ )
- $ta_1$  : Temperatur udara rata-rata masuk APH ( $^{\circ}C$ )

### 2.11. Efisiensi Termal *Air Heater*

Efisiensi termal adalah nilai perbandingan antara perpindahan panas yang terjadi secara nyata pada waktu tertentu dengan nilai perpindahan panas sempurna secara teoritis. Dalam prakteknya, nilai efisiensi ini tidak mungkin sempurna 100% karena dalam perpindahan panas pasti akan terjadi kebocoran, kehilangan panas ke suhu lingkungan, dan lain sebagainya. Selain itu, elemen pemindah panas juga memiliki tahanan yang juga dapat menghambat perpindahan panas yang terjadi. Seiring berjalannya waktu, tahanan pada elemen pemindah panas bisa saja terus naik sehingga menurunkan efisiensi perpindahan panasnya. Nilai efisiensi perpindahan panas pada *air heater* dapat dicari dengan persamaan <sup>14</sup>:

$$\eta = \frac{tg_1 - tg_{2NL}}{tg_1 - ta_1} \times 100 \% \quad (2-14)$$

#### Keterangan

- $\eta$  : Efisiensi termal sisi gas buang (%)
- $tg_1$  : Temperatur gas masuk APH ( $^{\circ}C$ )
- $tg_{2NL}$  : Temperatur gas keluar *air preheater* dengan koreksi pada kondisi tidak ada kebocoran udara ( $^{\circ}C$ )
- $ta_1$  : Temperatur udara rata-rata masuk APH ( $^{\circ}C$ )

---

<sup>14</sup> Anonim, Performance Test Code 4.3., American Society of Mechanical Engineering, America 2003, hal 21.

### 2.12. *X-ratio*

Nilai *x-ratio* adalah bilangan tak berdimensi yang berarti nilai perbandingan antara kapasitas kalor sisi fluida dingin yang melewati *air heater* dengan nilai kapasitas kalor yang fluida panas yang melewati *air heater*. Seiring berjalannya waktu, nilai *x-ratio* juga ikut turun seperti halnya efisiensi termal. Nilai *x-ratio* dapat dihitung dengan persamaan<sup>15</sup>:

$$x - ratio = \frac{C_{udara}}{C_{gas}} \quad (2-15)$$

$$x - ratio = \frac{\dot{m}_{a\ tot} \times Cp_a}{\dot{m}_g \times Cp_g} \quad (2-16)$$

$$x - ratio = \frac{tg_1 - tg_{2NL}}{ta_2 - ta_1} \quad (2-17)$$

di mana :

$C_{udara}$  : Kapasitas kalor sisi udara (Watt/°C)

$C_{gas}$  : Kapasitas kalor sisi gas (Watt/°C)

$\dot{m}_{a\ tot}$  : laju alir udara total primer dan sekunder (kg/s)

$Cp_a$  : Kalor spesifik rata-rata pada sisi udara (J/kg °C)

$\dot{m}_g$  : Laju alir gas yang mengalir pada APH (kg/s)

$Cp_g$  : Kalor spesifik rata-rata pada sisi gas (J/kg °C)

$tg_1$  : Temperatur gas masuk APH (°C)

---

<sup>15</sup> Ibid, hal. 25

$tg_{2NL}$  : Temperatur gas keluar *air preheater* dengan koreksi pada kondisi tidak ada kebocoran udara ( $^{\circ}\text{C}$ )

$ta_2$  : Temperatur udara rata-rata keluar APH ( $^{\circ}\text{C}$ )

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