

2. DASAR TEORI

2.1 Pengertian *boiler*

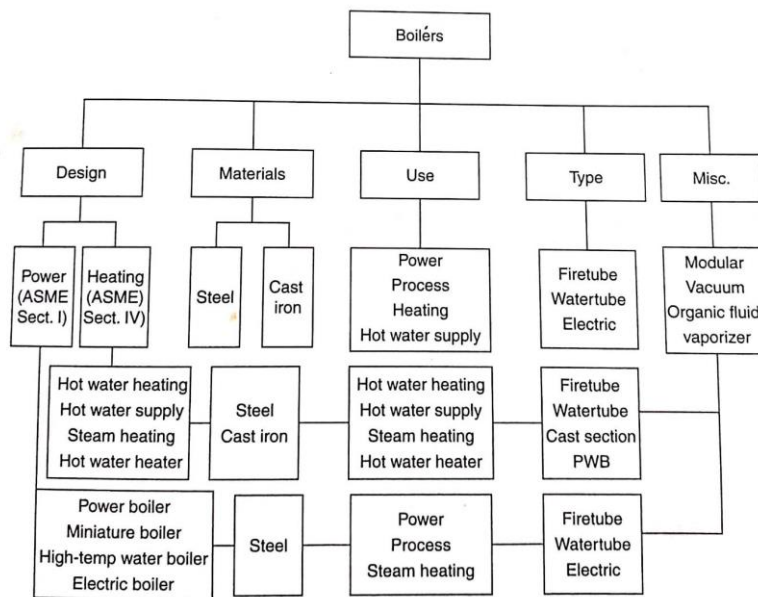
Boiler, menurut Praktiko (2008), adalah mesin yang dirancang untuk menghasilkan uap dengan mengubah air menjadi uap dengan menggunakan kalor dari gas yang terbakar. Boiler dapat digunakan di banyak tempat, seperti mall, gedung perkantoran, pabrik, pembangkit listrik, industri, dan bahkan di perumahan, menurut Malek (2005). Uap yang dibuat oleh *boiler* digunakan untuk menghasilkan tenaga listrik dan pemanas untuk bangunan, air minum, dan kebutuhan industri lainnya.

2.1.1 Klasifikasi *boiler*

Boiler dirancang dan dibangun sesuai dengan kode yang diadopsi oleh berbagai yurisdiksi pemerintah. Kode *boiler and pressure vessel* yang diterbitkan oleh *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* diterima secara internasional. *Boiler* diklasifikasikan menjadi dua yaitu *boiler* bertekanan tinggi dan *boiler* bertekanan rendah. Setiap *boiler* yang beroperasi pada uap lebih dari 15 psig dianggap bertekanan tinggi dan sebaliknya jika uap dibawah 15 psig maka akan dianggap bertekanan rendah (Malek, 2005, P.6).

2.1.2 Jenis-jenis *boiler*

Jenis-jenis *boiler* diklasifikasikan sesuai cakupan desain dan konstruksi *boiler* sesuai persyaratan kode dalam kode *ASME boiler and pressure vessel*. Berikut Gambar 2.1 jenis boiler sesuai klasifikasinya:



Gambar 2. 1 Klasifikasi Boiler

Sumber: Malek, M.A. (2005). *Power boiler design, inspection, and repair: ASME code simplified*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc, p.7

2.1.2.1 Klasifikasi berdasarkan kode ASME

A. Power boiler

Power boiler (*boiler* pembangkit listrik) dimana uap dihasilkan pada tekanan lebih dari 15 psi.

B. Heating boiler

Heating boiler (*boiler* pemanas) dimana uap dihasilkan pada tekanan kurang dari 15 psi atau air panas dihasilkan pada tekanan tidak melebihi 160 psi dan/atau suhu tidak melebihi 250°F/121.1°C

2.1.2.2 Klasifikasi berdasarkan tekanan

A. High Pressure

Boiler bertekanan tinggi adalah *boiler* dimana uap yang dihasilkan melebihi 15 psig. *Boiler* bertekanan tinggi digunakan untuk pembangkit listrik dan aplikasi proses. Tipe ini di desain dengan mengurangi ukuran fisik dan pipa uap untuk kapasitas yang sama.

B. Low Pressure

Boiler bertekanan rendah adalah *boiler* uap dimana beroperasi dibawah tekanan 15 psig atau sebuah *hot water boiler* dimana beroperasi 160 psig atau 250°F/121.1°C

2.1.2.3 Klasifikasi berdasarkan *output*

A. *Steam*

Boiler uap berupa 2 macam yaitu *boiler* uap *saturated* dan *boiler* uap *superheated*. *Boiler* uap *saturated* umumnya digunakan untuk proses industrial dan *boiler* uap *superheated* umumnya digunakan untuk pembangkit listrik.

B. *Hot water*

Hot water boiler menghasilkan air panas yang untuk kebutuhan pengaplikasian proses industrial atau pemanasan ruang.

2.1.2.4 Klasifikasi berdasarkan bahan bakar

A. *Gas fired*

Boiler berbahan bakar gas dapat berupa gas alam, gas propana atau bahan bakar cair lainnya.

B. *Oil fired*

Boiler berbahan bakar minyak dapat berupa BB disel dan kerosin.

C. *Coal fired*

Boiler berbahan bakar batubara digunakan untuk *boiler* besar, sebagian besar untuk *boiler* industri dan utilitas. Batubara adalah bahan bakar yang sangat ekonomis untuk penggunaan *boiler* pembangkit listrik.

D. *Electric*

Boiler listrik digunakan sebagai pengganti bahan bakar konvensional. Listrik adalah energi bersih dan populer untuk *boiler* yang digunakan untuk laboratorium penelitian, industri makanan, dan industri lainnya yang menganggap gangguan asap menjadi masalah.

2.1.2.5 Klasifikasi berdasarkan material

A. *Steel*

Boiler baja adalah *boiler* yang berbahan konstruksi untuk *boiler* utama dan bagian tekanannya terbuat dari baja

B. *Cast iron*

Boiler besi tuang adalah *boiler* yang berbahan konstruksi untuk *boiler* utama dan bagian tekanannya terbuat dari besi tuang. Besi tuang biasa digunakan untuk menjadi material dari *boiler* pemanas.

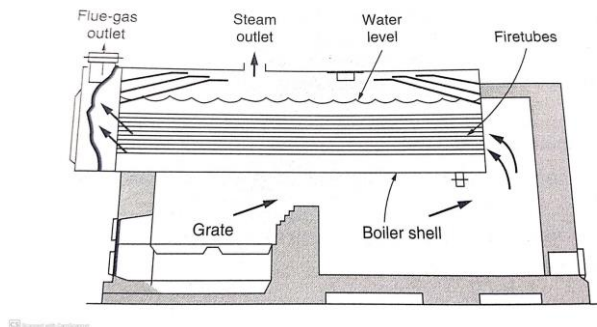
2.1.2.6 Klasifikasi berdasarkan penggunaan

- A. *Boiler* pembangkit listrik
- B. *Boiler* proses industrial.
- C. *Boiler* pemanas uap
- D. *Boiler* pemanas air
- E. *Boiler* pasokan air panas

2.1.2.7 Klasifikasi berdasarkan pipanya

A. *Firetube*

Boiler Firetube adalah *boiler* yang dimana produk pembakarannya melewati pipa yang dikelilingi oleh air. Badan dari *boiler* berisi air dan memiliki aplikasi mulai dari 15 sampai 3000 hp. Tekanan uap dalam *boiler firetube* dibatasi sebesar 450 psig. Ilustrasi *Boiler Firetube* menurut Malek (2005) ditunjukkan pada Gambar 2.2.

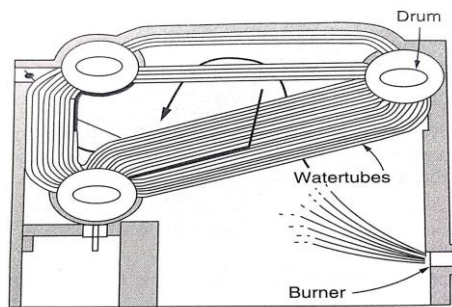


Gambar 2. 2 *Boiler firetube*

Sumber: Malek, M.A. (2005). *Power boiler design, inspection, and repair: ASME code simplified*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc, p.10

B. *Watertube*

Boiler watertube adalah *boiler* yang dimana air melewati pipa dan produk pembakaran mengelilingi pipa. Pipa-pipa tersebut dikurung dalam tungku pembakaran. Pipa ini terhubung ke drum. Air dipanaskan dan uap dihasilkan di atas drum. Ilustrasi *Boiler watertube* menurut Malek (2005) ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 *Boiler watertube*

Sumber: Malek, M.A. (2005). *Power boiler design, inspection, and repair: ASME code simplified*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc, p.10

C. *Tubeless*

Boiler tubeless adalah *boiler* yang tidak menggunakan pipa untuk mengalirkan air atau produk pembakaran. *Boiler* ini didesain secara vertikal, mempunyai tangki tekanan kaku dengan tungku radiasi primer besar dan saluran gas panas menggabungkan sirip konveksi dilas ke bejana tekan luar. Perpindahan panas lebih meningkat oleh penangkal perjalanan panas dan sirkulasi air.

2.1.2.8 Klasifikasi berdasarkan ragamnya

A. *Modular*

Boiler modular adalah kumpulan *boiler-boiler* kecil, terbuat dari baja atau besi tuang, yang secara kolektif bertindak sebagai *boiler* yang lebih besar dengan input termodulasi. *Boiler-boiler* kecil ini, yang dikenal sebagai modul, dirangkai bersama di lapangan.

Karena ukurannya yang lebih kecil, *start-up boiler* modular lebih cepat daripada sistem konvensional dengan kehilangan panas yang lebih sedikit sehingga memberikan respons yang lebih baik terhadap kebutuhan sistem. *Boiler* modular dapat digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga uap, pemanas ruang, dan air panas rumah tangga.

B. *Vacuum*

Boiler tertutup yang beroperasi dibawah tekanan atmosfer disebut *boiler* vakum. Penyegehan dari *boiler* ini dilakukan di pabrik pembuatnya.

2.2 Nilai kalor bawah Bahan Bakar limbah jagung

kalor yang didapat untuk pemanasan air pada umumnya diperoleh dari pembakaran bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan ialah bahan bakar padat limbah jagung. Limbah jagung disini dimaksud adalah tongkol jagung. Berdasarkan Apriyahanda (2019), *Higher Heating Value* (HHV) memperhitungkan terlepasnya kembali kalor laten uap air sedangkan *Lowe Heating Value* tidak memasukan energi kalor laten yang dilepaskan oleh terkondensasinya uap air. Menurut Rosmiati (2019), nilai kalor untuk pembakaran bahan bakar padat ditentukan sebagai berikut:

$$\text{HHV} = 33950 \times C + 144200 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 \times S \quad (2.1)$$

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2411 \times (M + 9 \times H_2) \quad (2.2)$$

Dimana:

HHV = nilai kalor bahan bakar seluruhnya (KJ/kg)

LHV = nilai kalor bahan bakar ketika air dan hidrogen dalam fasa uap (KJ/kg)

C = unsur karbon (%)

H = unsur hidrogen (%)

O = unsur oksida (%)

S = unsur sulfur (%)

M = Kadar air (%)

2.2.1 Kebutuhan kalor pada boiler

Menurut Moran et al. (2014), alat pengukur tekanan sering menunjukkan perbedaan antara tekanan absolut suatu sistem dan tekanan absolut atmosfer yang ada di luar alat pengukur. Besarnya perbedaan disebut tekanan gauge (P_{gauge}) sehingga untuk mencari tekanan gauge dalam sistem tertutup maka harus dikurangi oleh tekanan atmosfer (P_{atm})

Untuk menggunakan tabel termodinamika maka harus ditentukan tekanan absolut dari target tekanan gauge yang ditargetkan melalui persamaan berikut:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{atm}} \quad (2.3)$$

Dimana:

P_{abs} = tekanan absolut (bar)

P_{gauge} = tekanan gauge (bar)

P_{atm} = tekanan atmosfer (bar)

Setelah menemukan tekanan absolut dari perencanaan, perhitungan kalor yang dibutuhkan *boiler* untuk menghasilkan uap dengan laju tertentu menurut Tirtoatmodjo (1995) sebagai berikut:

$$\dot{Q} = SR \times (h_2 - h_1) \quad (2.4)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \text{laju aliran kalor (KJ/jam)} \\ SR &= \text{laju uap yang dihasilkan (kg/jam)} \\ h_1 &= \text{entalpi saturasi air masuk (KJ/kg)} \\ h_2 &= \text{entalpi saturasi uap yang dihasilkan (KJ/kg)} \end{aligned}$$

2.2.2 Kebutuhan bahan bakar

Berdasarkan Tirtoatmodjo (1995), jumlah kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan kalor total dari *boiler* berbahan bakar padat sebagai berikut:

$$B_e = \frac{\dot{Q}}{\eta \times LHV} \quad (2.5)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} B_e &= \text{Jumlah kebutuhan bahan bakar (kg/jam)} \\ \eta &= \text{efisiensi thermis boiler} \end{aligned}$$

2.2.3 Kebutuhan udara pembakaran

Pembakaran membutuhkan oksigen yang diambil dari udara. Dalam 1 kg udara kering terdiri dari 78,09% nitrogen, 20,95% oksigen, 0,93% argon, 0,04% karbon dioksida, dan gas-gas lainnya. Berdasarkan Djokosetyardjo (1987), kebutuhan udara teoritis yang digunakan dalam proses pembakaran 1 kg bahan bakar dengan sempurna yaitu:

$$U_{og} = \frac{100}{23,1} \times (2,67 C + 8 H - O + S) \quad (2.6)$$

$$U_{ov} = \frac{100}{29,8} \times (2,67 C + 8 H - O + S) \quad (2.7)$$

$$U_g = m \times U_{og} \quad (2.8)$$

$$U_v = m \times U_{ov} \quad (2.9)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} U_{og} &= \text{berat kebutuhan udara secara teoritis (kg udara/kg bb)} \\ U_{ov} &= \text{volume kebutuhan udara secara teoritis (m}^3 \text{ udara/kg bb)} \\ U_g &= \text{berat kebutuhan udara secara aktual (kg udara/kg bb)} \\ m &= \text{koefisien kelebihan udara (1,5} \leq m \leq 2) \text{ diasumsikan 2} \end{aligned}$$

U_v = volume kebutuhan udara secara aktual (m^3 udara/kg bb)

2.2.4 Jumlah gas asap yang dihasilkan

Perhitungan gas asap dari suatu pembakaran bahan bakar dapat sebagai berikut

$$G_{og} = U_{og} + (1-Ash) \quad (2.10)$$

$$G_{ov} = U_{ov} + 5,6 \times \left(H + \frac{O}{8} \right) + 1,24 H_2O + 0,8 N \quad (2.11)$$

$$G_g = m \times U_{og} + (1-Ash) \quad (2.12)$$

$$G_v = (m - 1) \times U_{ov} + G_{ov} \quad (2.13)$$

Dimana:

G_{og} = berat kebutuhan gas asap secara teoritis (kg gas asap/kg bb)

Ash = kadar abu dalam bahan bakar padat (%)

G_{ov} = volume kebutuhan gas asap secara teoritis (m^3 gas asap/kg bb)

G_g = berat kebutuhan gas asap secara aktual (kg gas asap/kg bb)

G_v = volume kebutuhan gas asap secara aktual (m^3 gas asap/kg bb)

2.2.5 Laju Gas Asap

Menurut Djokosetyardjo (1987), persamaan Laju aliran gas asap sebagai berikut:

Laju aliran massa gas asap:

$$\dot{m}_{v_{gas\ asap}} = G_g \times B_e \text{ (kg/jam)} \quad (2.14)$$

Dimana:

$\dot{m}_{v_{gas\ asap}}$ = laju aliran massa gas asap (kg/jam)

Laju aliran volume gas asap:

$$\rho_{gas\ asap} = \frac{G_g}{G_v} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.15)$$

$$\dot{V}_{gas\ asap} = \frac{\dot{m}_{v_{gas\ asap}}}{\rho_{gas\ asap}} \text{ (m}^3\text{/jam)} \quad (2.16)$$

Dimana:

$\rho_{gas\ asap}$ = massa jenis gas asap (kg/m^3)

$\dot{V}_{gas\ asap}$ = laju aliran volume gas asap (m^3 /jam)

2.3 Perpindahan Panas

Temperatur pada beberapa bagian *boiler* pastinya tidak semua homogen. Ketika ada perbedaan temperatur, pastinya ada perpindahan panas yang terjadi suhu yang tinggi ke suhu

yang rendah. Perpindahan panas yang terjadi pada *boiler* yaitu perpindahan panas konveksi dan radiasi. Perhitungan perpindahan panas diambil dari persamaan buku Bergman et al (2011).

2.3.1 Perpindahan panas konveksi

Menurut Bergman et al (2011), perpindahan konveksi terjadi dari adanya perpindahan panas antara zat padat dan zat cair. Persamaan konveksi yang terjadi terdapat pada rumus bilangan *Reynolds* sebagai berikut:

$$Re_D = \frac{v_{fluida\ asap} \times ID}{\nu} \quad (2.17)$$

Dimana:

Re_D	= bilangan <i>Reynold</i>
$v_{fluida\ asap}$	= Kecepatan fluida asap (m/s)
ID	= Diameter dalam pipa (m)
ν	= viskositas absolut (N.s/m ²)

Berdasarkan Bergman et al. (2011), untuk mencari nilai *Nusselt* dalam aliran turbulen, diperlukan persamaan sebagai berikut:

$$Nu_D = 0,023 \cdot (Re_D)^{\frac{4}{5}} \cdot (Pr)^n \quad (2.18)$$

Dimana:

n	= 0,3 (untuk <i>cooling</i>)
	= 0,4 (untuk <i>heating</i>)
Pr	= <i>Prandtl number</i>

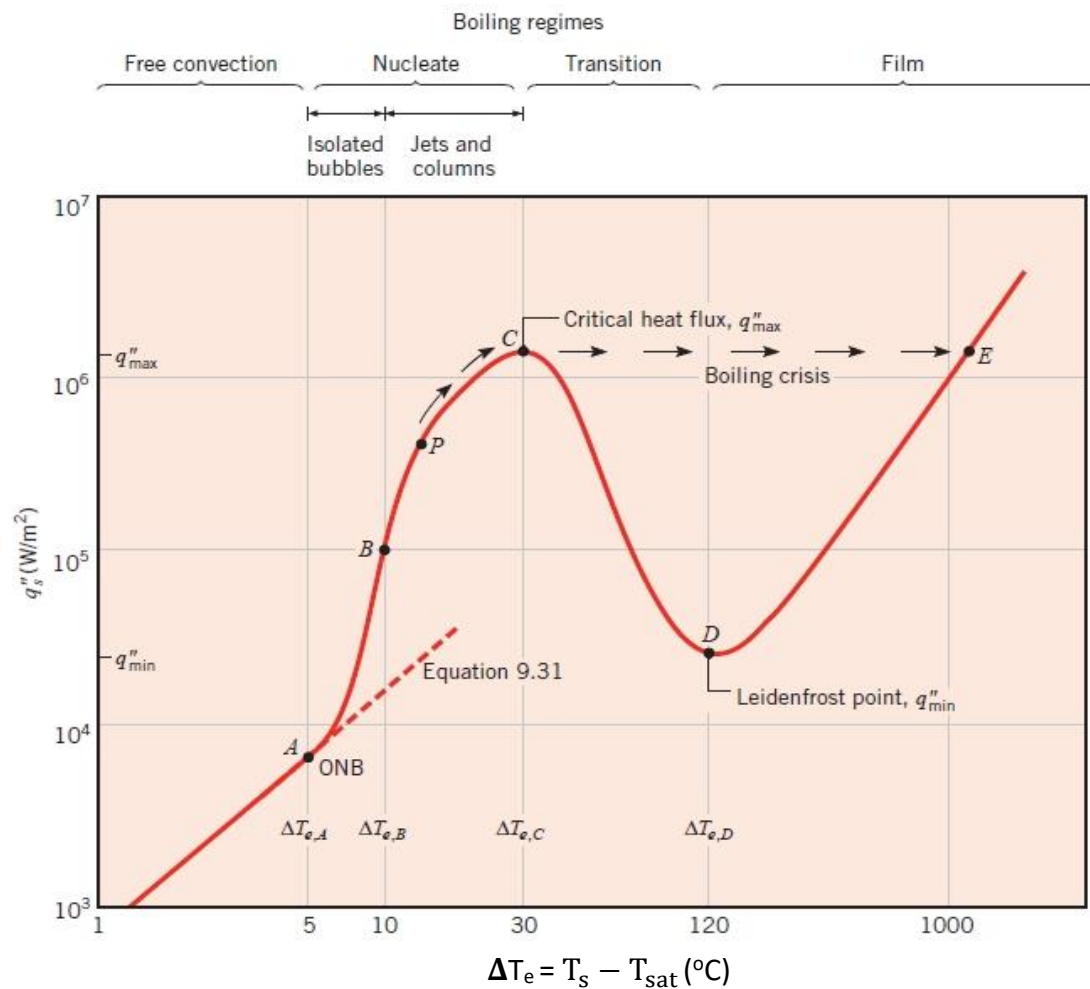
Jika bilangan Reynoldsnya kurang dari 2300, aliran tersebut laminar, dan jika lebih dari 2300, aliran tersebut turbulen. *Nusselt number* untuk aliran laminar sebesar 3,66. Untuk mencari koefisien konveksi laminar dalam silinder, diperlukan persamaan sebagai berikut:

$$h = Nu_D \frac{k}{D} \quad (2.19)$$

Dimana:

Nu_D	= <i>Nusselt number</i>
k	= konduktivitas termal (W/m ² K)
D	= diameter (m)

2.3.1.1 Pool Boiling



Gambar 2. 4 Pool boiling

Sumber: Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons. p.658

Keterangan variabel pada Gambar 2.4:

- T_s = surface temperature (°C)
- T_{sat} = saturated temperature (°C)
- ΔT_e = excess temperature = $T_s - T_{sat}$

Menurut Bergman et al. (2011), pada *pool boiling* di Gambar 2.4 dibagi 4 tahap fase yaitu:

1. Free Convection Boiling

Fase ini terjadi jika $\Delta T_e \leq \Delta T_{e,A}$ pada permukaan bidang, uap yang terbentuk masih belum cukup bersinggungan dengan fase *liquid* sehingga tidak dapat menyebabkan *boiling* pada temperature saturasi.

2. Nucleate Boiling

Fase ini terjadi Jika $\Delta T_{e,A} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,C}$ dimana $\Delta T_{e,C} = 30^\circ\text{C}$ pada daerah ini dibagi menjadi 2 state yaitu:

- State A-B*: Pada permukaan bidang yang terisolasi, terbentuk gelembung uap.
- State B-C*: Pada permukaan bidang yang terisolasi, gelembung uap meninggalkan permukaan dan membentuk butiran uap

3. Transition Boiling

Fase ini terjadi jika $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$ dimana $\Delta T_{e,D} = 120^\circ\text{C}$. Pada daerah ini, *boiling* pada lapisan tidak stabil. Gelembung uap terbentuk sehingga lapisan uap mulai terbentuk dari permukaan yang dipanaskan.

4. Film Pool Boiling

Fase ini terjadi jika $\Delta T_e \geq \Delta T_{e,D}$. Titik D disebut *leidenfrost point* dimana fluks panas pada permukaan terjadi secara minimum dan uap menutupi seluruh permukaan. Pada bagian ini, koefisien konveksi permukaan pipa air yang terendam di dalam air dihitung berdasarkan Bergman et al. (2011). ΔT_e merupakan selisih antara temperatur (T_s) dengan temperatur saturasi (T_{sat}). Untuk *film pool boiling* dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$h_{konv} = CC \times \left[\frac{k_v^3 \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot (h_{fg} + 0,8 \cdot c_{pv}(T_s - T_{sat}))}{\mu_v \cdot ID (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.20)$$

Dimana:

- h_{konv} = koefisien konveksi ($\text{W/m}^2\text{K}$)
- k_v = konduktivitas termal (W/mK)
- ID = diameter dalam pipa (m)
- CC = konstanta korelasi (silinder = 0,62)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- ρ_l = massa jenis *saturated liquid* (kg/m^3)
- ρ_v = massa jenis *saturated vapor* (kg/m^3)
- T_s = *surface temperature* (K)
- T_{sat} = *saturated temperature* (K)
- h_{fg} = kalor laten (J/kg)
- c_{pv} = *specific heat* (J/kgK)

μ_v = viskositas uap (N.s/m²)

Konstanta korelasi (cc) didapat berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Bromley (1948) dan ditemukan nilai konstanta silinder sebesar 0,62.

2.3.2 Radiasi

Ketika temperatur permukaan meningkat, radiasi melalui *boiling film* menjadi signifikan dan fluks panas meningkat dengan meningkatnya ΔT_e . Persamaan koefisien radiasi menurut Bergman et al. (2011) sebagai berikut:

$$h_{rad} = \frac{\sigma \cdot (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (2.21)$$

$$h = h_{konv} + \frac{3}{4} h_{rad} \quad (2.22)$$

Dimana:

h_{rad} = koefisien radiasi (W/m²K)

h = koefisien konveksi (W/m²K)

σ = konstanta stefan-boltzman (5,67.10⁻⁸ W/m²K⁴)

Laju perpindahan panas dari fluida di dalam pipa dengan suhu yang lebih tinggi ke fluida di luar dengan suhu yang lebih rendah disebabkan oleh koefisien konduksi material pipa (k).

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{h_o}} \quad (2.23)$$

Dimana:

U_i = koefisien konduktivitas kalor (W/m²K)

h_o = koefisien konveksi diluar pipa (W/m²K)

h_i = koefisien konveksi didalam pipa (W/m²K)

r_i = jari-jari dalam pipa (m)

r_o = jari-jari luar pipa (m)

2.3.3 Log Mean Temperature Difference

Metode untuk menghitung perbedaan suhu rata-rata antara dua aliran fluida dalam sebuah *heat exchanger* adalah *Log Mean Temperature Difference* (LMTD). Analisis dan perancangan *heat exchanger* biasanya menggunakan teknik ini untuk menentukan luas permukaan yang diperlukan untuk terjadi transfer kalor yang diinginkan (Cengel, 2015).

ΔT_{lm} untuk aliran paralel dapat ditentukan sebagai:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{ho} - T_{co}) - (T_{hi} - T_{ci})}{\ln \left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right)} \quad (2.24)$$

Dimana:

- T_{ho} = temperatur gas keluar (K)
- T_{hi} = temperatur gas masuk (K)
- T_{co} = temperatur fluida keluar (K)
- T_{ci} = temperatur fluida masuk (K)

2.3.4 Laju perpindahan panas total

Laju aliran perpindahan panas total dapat ditentukan sebagai berikut:

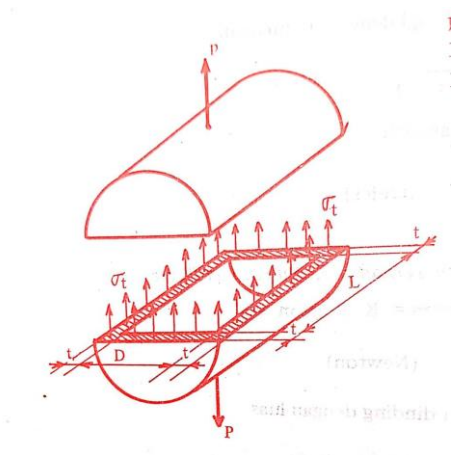
$$\dot{Q} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_{lm} \quad (2.25)$$

Dimana:

- $\dot{Q}$ = Laju aliran kalor (J/s)
- A = luas total pipa (m²)
- ΔT_{lm} = *log mean temperature difference* (K)

2.4 Tebal tangki boiler

Tangki *boiler* diperhitungkan memiliki 2 kemungkinan antara lain kemungkinan terbelah dan kemungkinan terputus (Djokosetyardjo, 1987).



2.4.1 Perhitungan tangki boiler agar tidak terbelah

Gambar 2. 5 skema tangki terbelah

Sumber: Djokosetyardjo, M.J. (1987). *Ketel Uap*. Jakarta: P.T. Pradnya Paramita, p.174

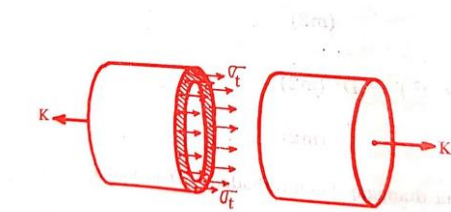
Agar tidak terbelah seperti ilustrasi Gambar 2.5, maka tebal tangki harus melebihi dari persamaan berikut:

$$t \geq \frac{D \times P}{2 \times \frac{\sigma_y}{sf} \times (1 + \frac{D}{L})} \quad (2.26)$$

Dimana:

- D = diameter tangki (m)
- P = tekanan dalam tangki (N/m²)
- L = panjang tangki (m)
- σ_y = tegangan tarik sebenarnya (N/m²)
- sf = *safety factor*

2.4.2 Perhitungan tangki *boiler* agar tidak terputus



Gambar 2. 6 Skema tangki terputus

Sumber: Djokosetyardjo, M.J. (1987). *Ketel Uap*. Jakarta: P.T. Pradnya Paramita, p.174

Agar tidak terputus seperti ilustrasi Gambar 2.6, maka tebal tangki harus melebihi dari persamaan berikut:

$$t \geq \frac{D \times P}{4 \cdot \frac{\sigma_a}{sf}} \quad (2.27)$$

Dimana:

- D = diameter tangki (m)
- P = tekanan dalam tangki (N/m²)
- σ_y = tegangan tarik sebenarnya (N/m²)
- sf = *safety factor*

2.5 Cerobong asap

Cerobong mengeluarkan gas asap dari *boiler* dengan laju tertentu. Cerobong juga digunakan untuk menimbulkan *stack draught* atau isapan cerobong. Selain itu, cerobong digunakan untuk mengeluarkan gas asap setinggi mungkin untuk mengurangi polusi (Djokosetyardjo, 1987). Menurut Tirtoatmodjo (1995), Persamaan laju gas asap dalam cerobong ditentukan sebagai berikut:

$$\dot{V}_{\text{gas asap}} = 0,25 \times \pi \times (d_{\text{cerobong}})^2 \times v_{\text{in cerobong}} \quad (2.28)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{gas asap}} &= \text{laju aliran volume gas asap (m}^3/\text{s)} \\ d_{\text{cerobong}} &= \text{diameter cerobong (m)} \\ v_{\text{in cerobong}} &= \text{laju gas asap dalam cerobong (m/s)} \end{aligned}$$

Kecepatan rata-rata gas asap keluar cerobong ditentukan sebagai berikut:

$$v_{\text{in cerobong}} = 1890(H_{\text{cerobong}} \cdot P_{\text{atm}} \left(\frac{1}{T_{\text{atm}}} - \frac{\rho_{\text{gas asap}}}{\rho_{\text{udara}} \cdot T_{\text{gas asap}}} \right))^{\frac{1}{2}} \text{ (ft/menit)} \quad (2.29)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} H_{\text{cerobong}} &= \text{tinggi cerobong asap (ft)} \\ P_{\text{atm}} &= \text{tekanan ATM (inHg)} \\ T_{\text{atm}} &= \text{temperatur ATM (}^{\circ}\text{R)} \\ T_{\text{g}} &= \text{temperatur asap (}^{\circ}\text{R)} \\ \rho_{\text{udara}} &= \text{massa jenis udara (lbm/ft}^3\text{)} \\ \rho_{\text{gas asap}} &= \text{massa jenis gas asap (lbm/ft}^3\text{)} \end{aligned}$$

2.6 Pompa

Selama boiler berfungsi, pompa air diperlukan untuk mengisi debit airnya. Menurut Praktiko (2008), secara ideal untuk mendapatkan sasaran uap maka diperlukan juga debit air yang ideal dengan sasaran uap. Karena adanya *continue blowdown* maka diperkirakan kebutuhan air akan bertambah 10% dari kebutuhan secara ideal.

Persamaan kapasitas air yang dibutuhkan sebagai berikut:

$$G = \frac{SR + 0,1 \times SR}{3600} \quad (2.30)$$

$$W = \frac{G}{\rho} \quad (2.31)$$

Dimana:

$$G = \text{kapasitas berat air (kg/s)}$$

SR = laju uap yang dihasilkan (kg/jam)

W = kapasitas volume uap (m³/s)

ρ = massa jenis air (1000 kg/m³)

Tinggi kenaikan pompa ditentukan sebagai berikut:

$$H = H_{\text{geo}} + \frac{P_{\text{pompa}}}{\rho} + H_{\text{loss}} \quad (2.32)$$

Dimana:

H = Tinggi kenaikan pompa (mka)

H_{geo} = geodetik *head*/perbedaan tinggi elevasi air (m)

P_{pompa} = tekanan pompa (kg/cm²)

H_{loss} = jumlah *losses* diambil 10% dari ($\frac{P_{\text{pump}}}{\rho}$)

Persyaratan untuk tekanan pompa yaitu:

$$P_{\text{pompa}} \geq 1,25 P_{\text{boiler}} \quad (2.33)$$

Persyaratan debit pompa air yaitu:

$$V_{\text{pompa}} \geq 1,25 V_{\text{boiler}} \quad (2.34)$$

Setelah persamaan diatas, selanjutnya perlu untuk menentukan daya pompa agar dapat memilih pompa yang dibutuhkan sesuai minimal daya nya.

$$N = \frac{W \times \rho \times H}{75 \times \eta} \quad (2.35)$$

Dimana:

N = Daya pompa (Hp)

η = Efisiensi pompa (%)