

## ANALISIS KAPASITAS PANAS DAN EFISIENSI UNTUK PERANCANGAN KETEL UAP JENIS PAKET TIPE DUA HALUAN DENGAN KAPASITAS 8 TON UAP/JAM

Ery Diniardi<sup>1</sup>, Anwar Ilmar Ramadhan<sup>1</sup>, Hasan Basri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

<sup>2</sup> D3-Otomotif dan Alat Berat, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

email: [erydiniardi@yahoo.co.id](mailto:erydiniardi@yahoo.co.id)

### ABSTRAK

*Ketel uap dapat diklasifikasikan dengan berbagai cara namun kenyataannya ada dua kelompok umum yang keduanya bergantung pada orientasi lintasan aliran atau uap dan gas panas. Ketel uap pipa api jenis paket tipe dua haluan (Two-pass Packaged Fire-tube Boiler) umumnya memakai bahan bakar cair, dimana nyala api hasil pembakaran mengalir kebelakang kemudian ke kelompok pipa-pipa api bagian bawah dan akhirnya membelok kembali melalui gugus pipa-pipa api bagian atas selanjutnya keluar melalui cerobong asap. Bidang pemanas pada ketel ini terdiri dari dinding silinder api dan dinding-dinding pipa-pipa api. Untuk itu hal tersebut menjadi dasar dari perencanaan ketel uap jenis paket tipe dua haluan dengan kapasitas 8 ton uap/jam. Dari hasil perhitungan yang dilakukan diperoleh hasil sebagai berikut: kapasitas uap 8 ton/jam, tekanan kerja 1 MPa, konsumsi bahan bakar 615,69 kg bahan bakar/jam, dimensi ketel: Diameter = 2000 mm, panjang ketel = 3200 mm, Tebal dinding = 17 mm, dengan material untuk ketel SCM 3, tingginya temperatur gas asap yang dibuang sebesar 337<sup>o</sup> C diakibatkan tidak terpasangnya unit pemanas lanjut (superheater) yang merupakan alat untuk menuaikan efisiensi ketel yang biasa digunakan pada ketel jenis lain.*

*Kata kunci: Ketel uap, kapasitas uap, temperature, efisiensi*

### ABSTRACT

*Boilers can be classified in various ways, but in reality there are two general groups that both are dependent on the orientation of the flow path or steam and hot gases. Two-pass packaged fire-tube boiler generally use liquid fuels, where the flame combustion products flow backward, then through the bottom group of fire-tubes and finally turned back through the top of fire-tubes before exit through the chimney. Heating elements of boiler consist of a cylindrical wall of fire and fire-tubes walls. It is the basis of two-pass packaged fire-tube boiler planning with a capacity of 8 tons of steam / hour. The calculation obtained the following results: steam capacity of 8 tons / hour, working pressure of 1 MPa, fuel consumption of 615.69 kg of fuel / hour, kettle dimensions: diameter = 2000 mm, length = 3200 mm, wall thickness = 17 mm, with material for SCM 3 kettle, gases temperature discharged at 337 °C caused by no installation of the further heating unit (superheater) which is a tool to fulfill efficiency boilers that usually used in other types of boilers.*

*Keywords: boiler, steam capacity, temperature, efficiency*

### PENDAHULUAN

Sepanjang sejarah manusia, kemajuan-kemajuan besar dalam kebudayaan selalu diikuti oleh meningkatnya konsumsi energi. Sekarang ini, konsumsi energi kelihatannya berhubungan langsung dengan tingkat kehidupan penduduk

serta derajat industrial kebutuhan energi yang terus meningkat merupakan suatu tantangan bagi para ahli bidang konversi energi untuk mencapai alat-alat pembangkit yang lebih efisien dan lebih baik.

Ketel uap merupakan alat pembangkit energi pertama yang ditemukan oleh manusia. Kelebihanannya adalah mudah dalam mengoperasikannya, bahan bakarnya mudah disesuaikan dengan keadaan yang ada, energi yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan baik untuk pembangkit energi maupun industri-industri lainnya yang menggunakan uap, murah dan efisiennya lebih besar.

Pada awalnya ketel uap terdiri dari drum yang tertutup pada ujung dan pangkalnya. Hingga kini telah mengalami banyak pengembangan untuk memperbaiki prestasinya sehingga memenuhi kebutuhan konsumen yang akan menggunakan. Uap (*steam*) yaitu gas yang timbul akibat perubahan fase air dari (cair) menjadi uap (gas) dengan cara pendidihan (*boiling*). Untuk melakukan proses pendidihan diperlukan energi panas yang diperoleh dari sumber panas misalnya dari pembakaran bahan bakar (padat, cair dan gas), tenaga listrik dan gas panas sebagai sisa proses kimia serta tenaga nuklir.

Penguapan bisa terjadi disembarang tempat dan waktu pada tekanan normal (atm mutlak), bila di atas permukaan zat cair tekanan turun (atau diturunkan) di bawah tekanan mutlak. Uap yang terjadi (dihasilkan) dengan cara demikian tidak mempunyai energi potensial jadi tidak dapat dipergunakan sebagai sumber energi.

## LANDASAN TEORI

Ketel uap berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensi) dari bahan bakar menjadi energi panas.

Ketel uap terdiri dari dua kelompok utama, yaitu:

- Dapur, sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
- Alat penguap (*evaporator*) yang mengubah energi pembakaran menjadi menjadi energi potensial uap.

Kedua komponen tersebut di atas telah dapat memungkinkan sebagai sebuah ketel uap yang berfungsi. Sedangkan komponen-komponen lainnya adalah:

- Corong asap dengan sistem tarikan gas asapnya, memungkinkan dapur berfungsi secara efektif.
- Sistem pemipaan, seperti pada pipa-pipa api dan ketel api, pipa-pipa air, pada ketel pipa

air, memungkinkan sistem penghantaran kalor yang efektif antara nyala api atau gas panas dengan air ketel.

- Sistem pemanas uap lanjut, sistem pemanas udara pembakaran serta sistem pemanas air pengisi ketel, berfungsi sebagai alat untuk menaikkan efisiensi ketel.

Supaya sebuah ketel beroperasi dengan aman, perlu adanya sistem pengaman yang disebut *apedansi*.

## Klasifikasi Ketel Uap

Ketel uap pada dasarnya terdiri dari bumbung (drum) yang tertutup pada ujung pengkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa-pipa api maupun pipa air.

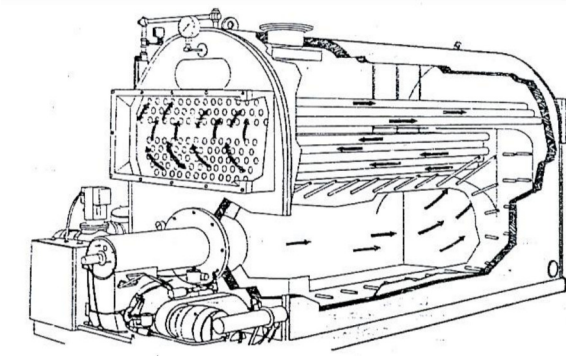
Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung sudut pandang masing-masing, yaitu:

1. Berdasarkan *fluida* yang mengalir dalam pipa, maka ketel dapat diklasifikasikan sebagai:
  - a. Ketel pipa api (*fire tube boiler*), yaitu ketel-ketel api dan gas asap yang digunakan untuk memanasi air dan uap, akan melalui silinder api, lorong-lorong api dan pipa-pipa atau tabung-tabung api (*fire cylinder, fire duct, fire pipes and fire tubes*), yang bagian luarnya terdapat air atau uap.

Jenis ketel-ketel uap yang tergolong dalam ketel lorong api atau ke pipa api adalah ketel-ketel uap kecil serta sederhana, yang hanya mampu memproduksi uap maksimum sebesar 10 ton uap/jam, dengan tekanan maksimum 24 kg/cm<sup>2</sup>. Jadi tergolong ketel-ketel untuk tekanan rendah.

Ketel-ketel ini merupakan awal dari pembuatan ketel-ketel selanjutnya. Ketel-ketel ini umumnya mempunyai isi air yang cukup besar sehingga merupakan tangki, dan karena itu pula sering disebut ketel-ketel untuk tekanan rendah. Yang termasuk golongan ini adalah ketel-ketel:

- ◆ Ketel *cornwall* dan ketel *Lancashire*
- ◆ Ketel *scholts* dan ketel *scholts* kembar
- ◆ Ketel kombinasi antara silinder api, lorong api dan pipa-pipa api, serta pipa uap, beserta beberapa variannya.
- ◆ Ketel lokomotif dan Lokomobil
- ◆ Ketel-ketel tegak, ketel *Cochran* danvariannya.



Gambar 1. Ketel uap pipa api, dua laluan Tipikal.

- b. Ketel pipa api (*water tube boiler*), ketel-ketel air atau uap di dalam pipa-pipa atau tabung-tabung yang dipanasi oleh api atau asap dibagian luarnya ketel-ketel pipa air ini umumnya bertekanan sedang yaitu antara 45 kg/cm<sup>2</sup> sampai dengan 140 kg/cm<sup>2</sup>.

### Dasar-dasar Pembentukan Uap

Uap air adalah sejenis *fluida* yang merupakan fasa gas dari air, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih di bawah tekanan tertentu. Uap air tidak berwarna bahkan tidak terlihat bila dalam keadaan murni kering. Uap air dipakai pertama sekali sebagai *fluida* kerja adalah oleh James Watt yang terkenal sebagai penemu mesin uap torak.

Uap air tidak mengikuti hukum-hukum gas sempurna sampai dia benar-benar kering (kadar uap 100%). Bila uap kering dipanaskan dilebih lanjut maka ia menjadi uap di panas (panas lanjut) dan selanjutnya dapat dianggap sebagai gas sempurna.

Kita ambil 1 kg es pada temperatur 10 °C, kemudian kita panaskan di bawah tekanan standar. Dapat dicatat bahwa temperatur es akan mulai naik sampai mendekati 0 °C, seperti yang diperlihatkan oleh garis AB dalam gambar 2.

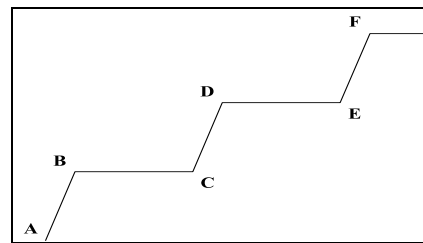
Sesudah itu akan terlihat dua macam fasa yang bercampur yaitu fasa padat (es) dan fasa cair (air), seperti yang diperlihatkan oleh garis BC, tidak ada kenaikan temperatur pada campuran ini hingga seluruh es mencair (terbentuk air).

Jumlah energi panas yang diberikan selama proses transformasi BC yang berlangsung tanpa kenaikan suhu disebut panas lebur, besarnya 80

kkal/kg. Titik 0 °C disebut titik lebur (titik beku) es. Bila pemanasan diteruskan terhadap 1 kg air pada 0 °C (titik C) maka temperatur air naik sampai 100 °C di bawah tekanan standar, seperti diperlihatkan oleh garis CD.

Bila proses pemanasan (panambahan energi panas) dilanjutkan sesuai garis DE di bawah tekanan standar, akan terlihat bahwa temperatur tidak berubah. Sebagian dari air berubah menjadi uap (fasa gas), jadi selama berlangsungnya penambahan energi panas pada fasa campuran ini, temperatur tidak naik tetapi energi panas terserap kedalam proses.

Akhir dari proses fasa campuran ini ialah terbentuknya uap air secara keseluruhan (disebut air mendidih) pada titik E, titik E ditandai oleh suhu 100 °C dan tekanan standar 1 atm. Angka 100 tersebut titik didih air di bawah tekanan 1 atm (1,033 kg/cm<sup>2</sup>).



Gambar 2. Proses Terbentuknya Uap Air

Tabel 1. Kesimpulan Proses ABCDEF

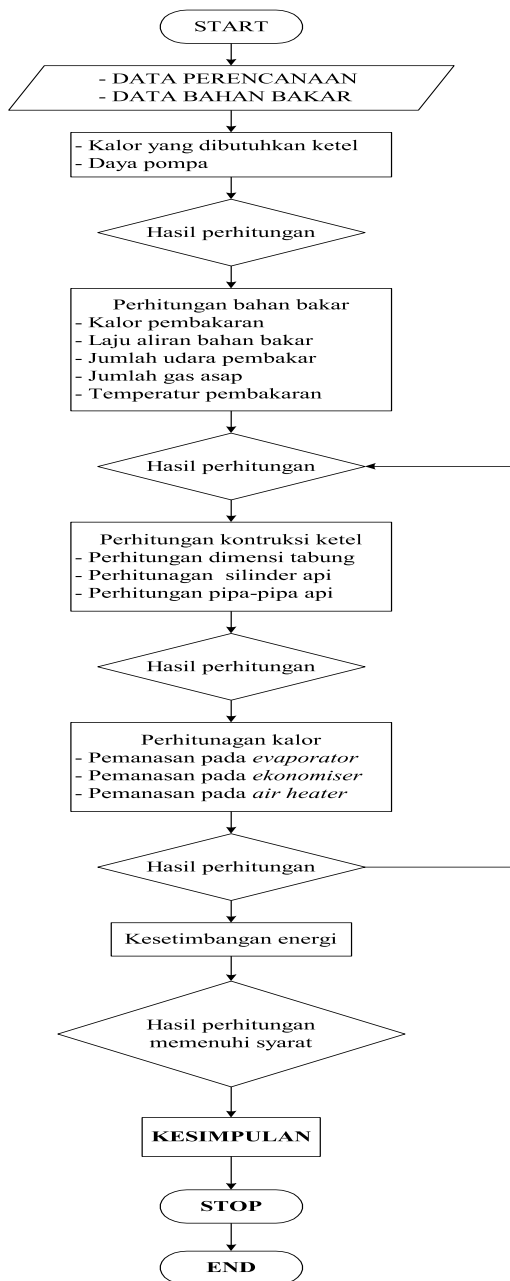
Proses	Energi Masuk	kkal/lg
Pemanasan es A-B	$C_1 (0 - (-10))$	$10 C_1$
Peleburan es B-C	Panas lebur	80
Penguapan air C-D	$C_2 (100 - 0)$	$100 C_2$
Penguapan D-E	Panas Laten	538,9
Pemanasan lanjut E-F	$C_3 (t_{sup} - t_{sat})$	$C_3 (t_{sup} - 100)$

### Ketel Uap Jenis Paket Tipe Dua Laluan

Ketel uap jenis pipa api pada dasarnya terdiri dari sebuah bejana tekanan (ketel) berisi air (tangki) dan mempunyai sejumlah pipa yang merupakan laluan bagi gas panas, dan energi panas dipindahkan dari gas panas tersebut ke air di dalam bejana. Pada sistem ketel uap jenis paket tipe dualaluan ini, direncanakan agar api atau gas asap selalu bersinggungan dengan dinding-dinding yang berbatasan dengan air atau uap.

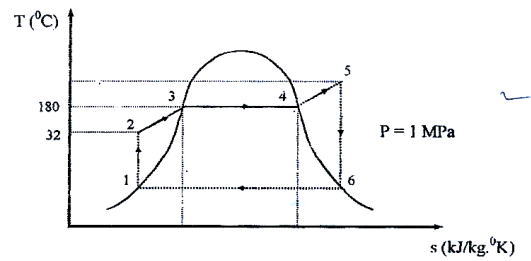
Pada ketel uap jenis paket tipe dua laluan, kontruksi dapurnya memakai bahan bakar cair, nyala api hasil pembakaran mengalir kebelakang, kemudian membelok kekelompok pipa-pipa api bagian bawah, dan akhirnya kembali kebelakang melalui gugus pipa api bagian atas, selanjutnya keluar melalui cerobong asap.

**METODOLOGI**



Gambar 3. Diagram Alir

**METODA PERHITUNGAN**



Gambar 4. Diagram T-s Ketel Uap

**Kalor yang dibutuhkan ekonomiser (Q<sub>eko</sub>)**

Kalor yang dibutuhkan ekonomiser untuk proses pemanasan air adalah:

$$Q_{eko} = G \cdot C_p (\Delta t) = G \cdot C_p (t_3 - t_2) \quad [1]$$

Dengan:

Q<sub>eko</sub> = Kalor yang dibutuhkan ekonomiser (KJ/jam)

G = Laju aliran massa uap, 8000 kg/jam

C<sub>p</sub> = Kalor spesifik pada 180

$$= 4,417 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

**Kalor yang dibutuhkan evaporator (Q<sub>eva</sub>)**

Kalor yang dibutuhkan evaporator (Q<sub>eva</sub>) untuk proses pembentukan air menjadi uap adalah:

$$Q_{eva} = G(h_4 - h_3) \quad [2]$$

Dengan:

Q<sub>eva</sub> = Kalor yang dibutuhkan evaporator (KJ/jam)

G = Laju aliran massa uap, 8 ton/jam (=8000 kg/jam)

h<sub>3</sub> = Entalpi air keluar ekonomiser, 762,8 KJ/kg

h<sub>4</sub> = Entalpi uap keluar evaporator, 2778,1 KJ/kg

**Kalor total yang dibutuhkan ketel (Q<sub>t</sub>)**

Jumlah kalor yang dibutuhkan ketel adalah sebagai berikut

Kalor total yang dibutuhkan = kalor ekonomiser + kalor evaporator

$$Q_t = Q_{eko} + Q_{eve} \quad [3]$$

**Pompa Pengisian Ketel (Boiler Feed Water Pump)**

Pompa pengisian ketel mensuplai cairan bertekanan tinggi ke ketel dan biasanya bekerja dengan rentang tekanan yang cukup besar. Untuk tujuan ini umumnya dipakai pompa sentrifugal karena pompa tersebut dapat dibuat dengan bertingkat serta mampu bekerja dengan kecepatan putar yang tinggi. Adapun kapasitas aliran pompa yang dibutuhkan ketel adalah:

$$Q = \frac{G}{P} \quad [4]$$

Dengan:

- Q = Kapasitas aliran pompa, (m<sup>3</sup>/s)
- G = Kapasitas aliran uap, 8 ton/jam (=2,22 kg/s)
- P = Massa jenis air pada temperatur 32 °C = 995,06 kg/m<sup>3</sup>

$$W = P \times Q / \eta_p \quad [5]$$

Dengan:

- W = Daya pompa yang dibutuhkan, (KW)
- P = Tekanan pompa yang direncanakan, 1 MPa (=1,10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>)
- Q = Kapasitas aliran pompa, 0,00223 (m<sup>3</sup>/s)
- $\eta_B$  = Efisiensi pompa diasuransikan, 80% (=0,8)

**Bahan Bakar**

Bahan bakar yang digunakan pada perencanaan ini adalah bahan bakar minyak solar dengan komposisi sebagai berikut:

- Berat jenis pada 60/60 °F = 0,98 kg/dm<sup>3</sup>
- Titik Nyala (*Flaming point*) = 100 °C
- Titik Beku (*pour point*) = 36 °F
- Karbon, C = 85,6 % wt
- Hidrogen, H = 11,0 % wt
- Belerang, S = 3,0 % wt
- $U_{ov}$  = 10,61 m<sup>3</sup>/kg
- Kadar berat (CO<sub>2</sub> + SO<sub>2</sub>) = 16,1% wt
- LHV = 40800 KJ/kg

Maka diperoleh besar nilai pembakaran tertinggi (HHV), yaitu:

$$HHV = 33915C + 144033 \left[ H - \frac{o}{8} \right] + 10468S \quad [6]$$

**Jumlah bahan bakar yang dibutuhkan oleh ketel uap (BB)**

Untuk memproduksi uap sebesar 8 ton uap/jam, bahan bakar (BB) yang digunakan adalah:

$$BB = \frac{Q}{LHV \times \eta_B} \quad [7]$$

Dengan:

- BB = Pemakaian bahan bakar (Kg/Jam)
- Q = Jumlah kalor yang dibutuhkan ketel, 21,3521. 10<sup>6</sup> KJ/jam
- LHV = Nilai pembakaran terendah, 40800 KJ/kg
- $\eta_B$  = Efisiensi boiler, 85%

**Jumlah Udara Pembakaran Pada Ketel Uap**

Dengan mengetahui jumlah komposisi minyak bakar sebagai bahan bakar yang digunakan, maka dapat yang digunakan, maka dapat diketahui jumlah kebutuhan udara pembakaran untuk pembakaran yang sempurna.

**Kebutuhan Udara teoritis (U<sub>ov</sub>)**

Jumlah udara teoritis yang dibutuhkan untuk membakar dengan sempurna 1 kg minyak bakar tersebut.

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

**Jumlah Gas Asap Yang Terbentuk (G<sub>v</sub>)**

$$\begin{aligned} C + O_2 &= CO_2 \\ S + O_2 &= SO_2 \\ G_v &= m.U_{ov} + G_{ov} - U_{ov} \end{aligned} \quad [9]$$

**Jumlah Udara Pembakar (U)**

Dengan mengetahui susunan bahan bakar, maka dapat dihitung jumlah kebutuhan udara pembakar (U) untuk terjadinya pembakaran yang sempurna.

$$U = m \times U_{ov} \quad [10]$$

Dengan:

- U = Kebutuhan udara sebenarnya (m<sup>3</sup> udara/kg bahan bakar)
- m = Angka kelebihan udara (*Excess Air*) = 1,4
- $U_{ov}$  = Kebutuhan udara teoritis = 10,61 m<sup>3</sup> udara/kg bahan bakar.

### Temperatur Pembakaran

Jika susunan dan jumlah gas asap diketahui maka dapat pula dihitung temperatur pembakarannya dengan catatan bila diketahui pula atau diasumsikan jumlah kehilangan panas dan jumlah panas yang dipancarkan langsung dari bunga api, gas-gas dan rangka bakar, kebidang yang dipanaskan. Panas sisanya yang terbentuk digunakan untuk menaikkan temperatur gas asap.

Pada perencanaan ini kerugian di dalam tungku diasumsikan 3 %, sedangkan panas yang dipancarkan langsung sebesar 30 % dari panas yang terbentuk dan temperatur bahan bakar dan udara masuk (temperatur ruangan) kedalam ketel diasumsikan 32 °C (305 °K).

Dan dari persamaan sebelumnya sdapat diketahui pula setiap kg bahan bakar membentuk 10,056 m<sup>3</sup> gas asap kering diantaranya 1,619 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, susunan gas asap dengan demikian terdiri dari:

$$(N_2 + O_2) \quad [11]$$

Dengan:

N<sub>2</sub> = gas asap kering

O<sub>2</sub> = oksigen

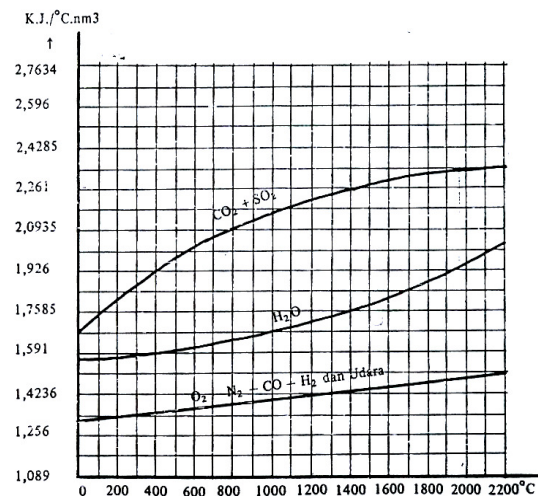
$$T_t = \frac{Q_{ga}}{\Delta Q} \quad [12]$$

Dengan:

T<sub>t</sub> = Temperatur tungku (°C)

Q<sub>ga</sub> = Panas gas asap (KJ/Kg bahan bakar)

ΔQ = Jumlah Panas (KJ/kg °C bahan bakar)



Gambar 5. Panas Jenis Gas Antara 0 °C hingga 2200 °C

### Perancangan Dinding Ketel

Pada ketel uap tipe ini konstruksi dapurnya memakai bahan bakar cair, nyala api hasil pembakaran mengalir kebelakang, kemudian membelok kekelompok-kelompok pipa-pipa api bagian bawah dan akhirnya membelok kembali kebelakang melalui gugus pipa-pipa api bagian atas, selanjutnya kecerobong asap. Bidang pemanas ketel ini terdiri dari dinding silinder api dan dinding pipa-pipa api.

### Perancangan Dinding Ketel (Drum)

Adapun dinding ketel yang direncanakan ini diperhitungkan terhadap dua kemungkinan yaitu kemungkinan putus dan kemungkinan boleh data perencanaan dinding tersebut sebagai berikut:

- Diameter dalam drum ketel, D=2000mm
- Panjang drum bagian dalam ketel, L = 3200 mm
- Tekanan dalam drum ketel, P= 1 Mpa (=1 N/mm<sup>2</sup>)
- Faktor keamanan, S<sub>f</sub> = 4
- Bahan yang digunakan baja chrom *molibden*, SCM 3 dengan kekuatan tarik, σ<sub>t</sub> = 95 kg/mm<sup>2</sup> (=931,63 N/mm<sup>2</sup>) . Untuk mencegah terjadinya kerusakan pada dinding ketel, kekuatan tarik yang diizinkan adalah:

$$\sigma_{izin} = \frac{\sigma_t}{S_f} \quad [13]$$

$$V = \frac{S - d_h}{s} \quad [14]$$

Dengan:

S = Jarak garis tengah lubang pipa-pipa, 200 mm

d<sub>h</sub> = Diameter pipa api yang direncanakan, 70 mm

V = Faktor kelemahan

$$t = \frac{D.P}{(2.v.\sigma_{izin}) / K + P} \quad [15]$$

Dengan:

T = tebal drum bagian dalam ketel (mm)

D = Diameter dalam drum ketel, 2000 mm

P = Tekanan didalam drum ketel, 1 Mpa

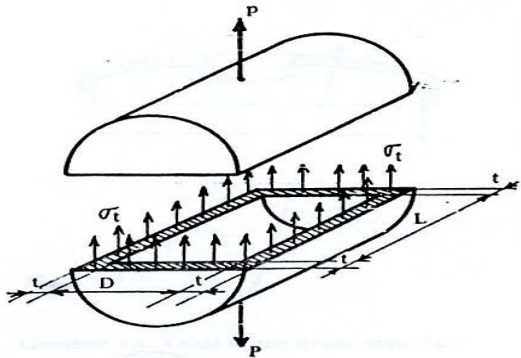
V = Faktor kelemahan, 0,65

$$t_u = \frac{P.R.K}{2.\sigma_{izin}} \quad [16]$$

Dengan:

σ<sub>izin</sub> = Kekuatan tarik yang diizinkan, 232,9 N/mm<sup>2</sup>

- K = Faktor keamanan, 1,5  
 $t_u$  = Tebal ujung drum (mm)  
 P = Tekanan di dalam drum, 1 Mpa (1 N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{izin}$  = Kekuatan tarik yang diizinkan, 323,9 N/mm<sup>2</sup>  
 k = Faktor keamanan, 1,5  
 R = 1,3 D (direncanakan) = 2600 mm<sup>2</sup>



Gambar 6. Dinding ketel

### Perancangan Silinder Api

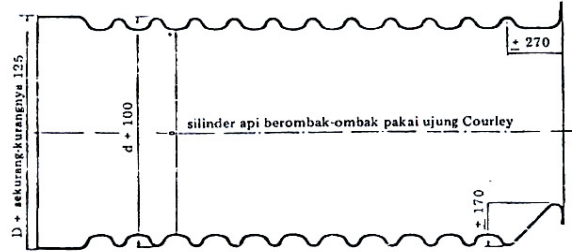
Silinder api adalah bagian pemanas yang mempunyai kecepatan penguapan yang besar. Artinya tiap-tiap m<sup>2</sup> dari silinder api dan tiap jam dapat membuat uap yang terbanyak dibandingkan dengan bagian yang lain dari bidang pemanas. Dalam hal ini silinder api berhubungan langsung dengan suhu yang tinggi (inti nyala) yang dengan jalan pancaran (*radiasi*) panas berpindah ke dinding silinder api. Ukuran pukol rata dari silinder api pada ketel *scotch* yang terbagi menurut profil penampangnya, yaitu silinder api berombak-ombak atau silinder api yang licin adalah sebagai berikut:

- Panjang dalam silinder api,  $l=2200$  mm
- Tebal dinding silinder api,  $t = 16$  mm
- Diameter dalam silinder api ( $d$ ) adalah

$$d = \frac{D - 0,3m}{2} \quad [17]$$

dengan:

- $d$  = Diameter silinder api, m  
 $D$  = Diameter drum, 2 m



Gambar 7. Silinder api

### Perancangan Pipa-pipa api

Pipa-pipa yang telah terletak sejajar di atas silinder api ini dihubungkan pada front muka dan dinding muka dari kamar nyala api, dengan data perencanaan sebagai berikut:

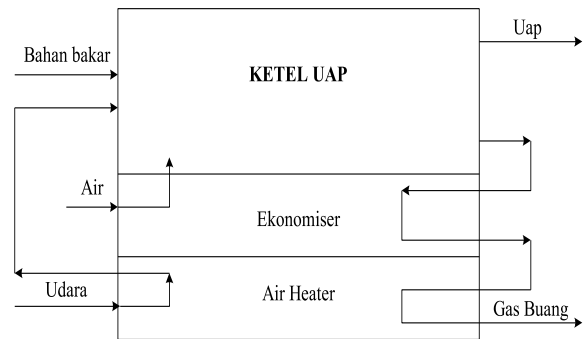
- Diameter dalam pipa,  $d = 70$  mm
- Bahan yang digunakan SCm 3
- Faktor keamanan,  $K = 1,5$
- Tekanan dalam pipa,  $P = 1$  Mpa (=1 N/mm)

Maka besarnya tebal pipa ( $t$ ) yang digunakan adalah:

$$t = 0,45 \sqrt{\frac{pd_h^2 \cdot k}{\sigma_{izin}}} \quad [18]$$

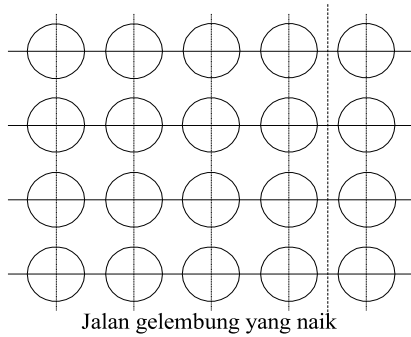
Dengan:

- $t$  = Tebal pipa (mm)  
 $d_h$  = Diameter dalam pipa, 70 mm  
 $P$  = Tekanan didalam drum ketel, 1 MPa  
 $\sigma_{izin}$  = Kekuatan tarik yang diizinkan, 232,9 N/mm  
 $K$  = Faktor keamanan



Gambar 5. Skematik aliran pada ketel pipa api yang direncanakan

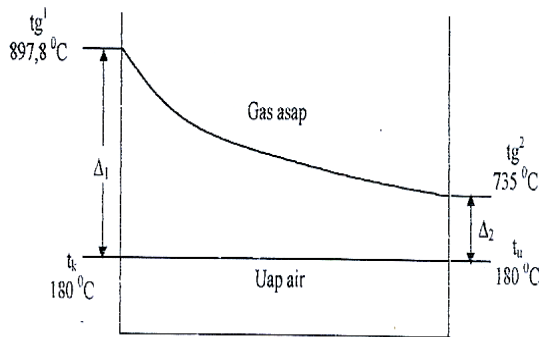




Gambar 8. Pipa-pipa api (*evaporator*) belah ketupat Scotch

**Pemanasan di Evaporator**

Dari hasil perhitungan diperoleh panas gas asap keluar dari silinder api (tungku pembakaran sebesar 897,8 °C) selanjutnya gas asap tersebut digunakan untuk memanaskan air sehingga menguap panas tekanan 1 MPa yaitu pada temperatur 180 °C. Adapun temperatur keluar gas asap (tg) adalah diperkirakan sebesar 735,5 °C dan keadaan tersebut dapat digambarkan dengan diagram seperti gambar di bawah ini:



Gambar 9. Distribusi Perpindahan Panas di *evaporator*

$$\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}} \quad [19]$$

$$Q_{UAPJENUH} = \sigma \cdot F \cdot \Delta_t$$

**Ekonomiser**

Gas asap setelah meninggalkan *evaporator* sebesar 735 °C sehingga akan merupakan kerugian panas yang besar bila gas tersebut

langsung dibuang lewat cerobong dengan demikian dengan memasang alat yang disebut *ekonomiser* dapat memanaskan air lebih dahulu sebelum masuk ke dalam drum ketel yang disebut pemanas air awal.

$$\Delta_t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \left( \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)} \quad [20]$$

Dengan:

- $\Delta_t$  = Selisih antara temperatur gas asap rata-rata dengan temperatur air rata-rata
- $\Delta_1$  = Selisih antara temperatur gas asap masuk, ke *ekonomiser* dengan temperatur air masuk *ekonomiser*.
- $\Delta_2$  = Selisih antara temperatur air gas asap keluar dari *ekonomiser* dengan temperatur air keluar air keluar dari *ekonomiser*.

$$Q_{eko} = G_{air} \cdot C_{pair} \cdot (T_{airkeluar} - T_{airmasuk}) \quad [21]$$

Dengan:

- $G_{air}$  = Laju aliran massa air, 8000 kg/jam
- $C_{pair}$  = Kalor spesifik air pada 180 °C = 4,417 KJ/Kg.K
- $T_{airkeluar}$  = Temperatur air keluar, 180 °C = 453 K
- $T_{airmasuk}$  = Temperatur air masuk, 32 °C = 305 K

$$Q_{gasasapeko} = Q_{aireko}$$

$$G_{gas} \cdot C_{pgas} \cdot (t_{gas} - t_{gasakeluar}) = G_{air} \cdot C_{pair} \cdot (t_{airkeluar} - t_{airmasuk}) \quad [22]$$

Dengan:

- $G_{gas}$  = Laju aliran massa gas, 615,69 Kg/jam
- $C_{pgas}$  = Panas jenis gas, 21,6 KJ/Kg °C
- $T_{gasmasuk}$  = Tempeeratur gas masuk *ekonomiser*, 479 °C
- $T_{gaskeluar}$  = Temperatur gas keluar *ekonomiser*, (°C )

$$Q_{AH} = G_{udara} \cdot C_{pudara} \cdot (t_{udarakeluar} - t_{udaramasuk}) \quad [23]$$

Dengan:

- $G_{udara}$  = Laju aliran massa udara pembakaran, 861,79 kg/jam
- $C_{udara}$  = Panas jenis udara pada 100 °C, 1,011 KJ/Kg.K



$$T_{gasmasuk} = \text{Temperatur udara masuk } 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= 373\text{ K}$$

$$T_{gaskeluar} = \text{Temperatur udara keluar, } 32\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= 305\text{ K}$$

$$G_{gas} \cdot C_{p\text{ gas}} \cdot (t_{gas} - t_{gas\ keluar})$$

$$= G_{udara} C_{udara} (t_{udara\ keluar} - t_{udara\ masuk}) \quad [24]$$

Dengan:

$$G_{gas} = \text{Laju aliran massa gas, } 615,69$$

$$\text{Kg/jam}$$

$$C_{p\text{ gas}} = \text{Panas jenis gas, } 21,6\text{ KJ/Kg }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{gas\ masuk} = \text{Temperatur gas masuk } ekonomiser,$$

$$479\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{gaskeluar} = \text{Temperatur gas keluar } ekonomiser,$$

$$(^{\circ}\text{C})$$

### Keseimbangan Energi

Dengan menggunakan persamaan [25] di bawah ini dapat ditentukan nilai dari keseimbangan energi yang terjadi didalam perancangan ketel uap berdasarkan nilai dari kapasitas panas dan efisiensinya.

$$Q_{total} = LHV.BB \quad [25]$$

Tabel 2. Keseimbangan energi

No	Panas yang diberikan	KJ/Jam	%	No	Panas yang diberikan	KJ/Jasm	%
1	Panas hasil pembakaran	25120152	100	1.	Panas efektif yang dibutuhkan		
				a.	<i>Evaporator</i>	$16,1224 \cdot 10^6$	64,18
				b.	<i>Ekonomiser</i>	$5,2297 \cdot 10^6$	20,82
				c.	<i>Air Heater</i>	$0,0592 \cdot 10^6$	0,24
				2.	Panas yang hilang akibat:		
					- Kerugian cerobong		
					- ikut gas asap		
					- Uap air		
					- radiasi		
	Total	25120152	100			25120152	100

**Rumus keseimbangan:**

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \quad [26]$$

### KESIMPULAN

Berdasarkan atas persamaan rumus dalam landasan teori dan analisa, maka dapat disimpulkan bahwa:

- a) Besar daya pompa (W) yang dibutuhkan oleh ketel uap tipe paket dua laluan dengan kapasitas 8000 kg uap/jam mencapai 2,788 kW
- b) Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar solar
- c) Efektifitas kalor yang terjadi di *evaporator* untuk merubah air menjadi uap jenuh di *evaporator*, 64,18 %

- d) Efektifitas kalor yang terjadi di *ekonomiser* untuk pemanasan awal air masuk kedalam unit ketel, 20,82 %
- e) Efektifitas kalor yang terjadi dari *air heater* untuk pemanasan udara pembakar 0,24 %
- f) Efektifitas total kalor yang dibutuhkan untuk membuat uap sebesar 8000 kg/jam 85,24 %
- g) Besarnya kerugian kalor yang diakibatkan oleh gas buang (gas asap), uap air dan radiasi adalah 14,76 %.
- h) Besar temperatur gas asap yang keluar sebesar 337 °C diakibatkan tidak adanya unit pemanas laju uap (*superheater*) yang merupakan salah satu alat yang umum digunakan untuk meningkatkan efisiensi ketel.
- i) Bahan yang digunakan pada konstruksi kecil; adalah bahan baja *chrom molibden*, SCM 3 dengan kuat tarik,  $\sigma_t = 95\text{ kg/mm}^2$ .

---

**DAFTAR PUSTAKA**

- Archi W Culp, Jr, 1996. "*Prinsip-prinsip Konversi Energi*", Erlangga, Cetakan ke-4, Jakarta.
- The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Steam Generating Unit"**, Power Test Codes.
- Fritz Dietzel, 1980. "*Turbin, pompa dan kompresor*", Erlangga, Jakarta.
- Ir. M. J. Djokosetyardjo, 1993. "*Ketel Uap*", Prandya Paramita, Cetakan ke-3, Jakarta.
- Ir. Sularso / suga kitokatsu, 1997. "*Dasar Perencanaan dan pemilihan Elemen Mesin*", Prandya Paramitha, Jakarta.
- Ir. Sularso, 1987. "*pompa dan Kompresor*", Prandya Paramit, Jakarta.
- Ir. Ayamsir A Muin, 1988. "*Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)*", Rajawali Press, Cetakan Pertama, Jakarta.
- Victor L.Streeter, 1985. "*Mekanika Fluida*". Erlangga, edisi ke-8, Jakarta.
- William C Reynolds and Henry C Perkins, 1994 "*Termodinika Teknik*". Erlangga, Cetakan ke- 5, Jakarta.