

## KETEL UAP (STEAM BOILER)

Sebuah ketel uap biasanya merupakan bejana tertutup yang terbuat dari baja. Fungsinya adalah memindahkan panas yang dihasilkan pembakaran bahan bakar ke air yang pada akhirnya akan menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan bisa dimanfaatkan untuk:

1. mesin pembakaran luar seperti: mesin uap dan turbin.
2. suplai tekanan rendah bagi kerja proses di industri seperti industri pemintalan, pabrik gula dsb.
3. menghasilkan air panas, dimana bisa digunakan untuk instalasi pemanas bertekanan rendah.

Istilah-istilah penting pada ketel uap

1. Kulit ketel. (boiler shell)

Dibuat dari pelat baja yang dilengkungkan membentuk silinder dan di keling atau dilas. Kulit ketel harus mempunyai kapasitas yang cukup bagi air dan uap.

2. Ruang bakar.

Adalah ruang, umumnya dibawah kulit boiler, tempat membakar bahan bakar yang akan digunakan untuk memanaskan air.

3. Panggangan.

Adalah sebuah pelat datar di dalam ruang bakar, dimana bahan bakar (batubara atau kayu) dibakar. Panggangan biasanya terdiri dari batang besi cor yang berjarak diantaranya supaya udara untuk pembakaran bisa melewatinya.

4. Tungku.

Adalah ruang diatas panggangan dan di bawah kulit ketel. Tungku biasa disebut juga kotak api (firebox).

5. Permukaan pemanas.

Adalah bagian dari permukaan ketel, dimana terkena langsung ke api (atau gas panas dari api).

6. Mounting.

Adalah semua *fitting* yang dipasang pada ketel supaya bisa beroperasi dengan benar. Fitting ini diantaranya adalah : indikator ketinggian, pengukur tekanan, katup pengaman dsb.

#### 7. Asesoris.

Adalah piranti-piranti yang merupakan bagian integral dari ketel namun tidak langsung terpasang pada bodi ketel. Yang termasuk asesoris antara lain: *superheater* (pemanas lanjut), ekonomiser, pompa umpan dsb.

### Esensi Ketel Uap Yang Baik

Berikut ini adalah esensi dari ketel uap yang baik.

1. Harus menghasilkan kuantitas maksimum uap dengan bahan bakar yang diberikan.
2. Harus ekonomis ketika dipasang, dan menghendaki sedikit perhatian ketika beroperasi.
3. Harus secara cepat bisa memenuhi beban yang berfluktuasi.
4. Harus bisa distarter dengan cepat.
5. Beratnya harus ringan.
6. Harus menempati ruang yang kecil.
7. Sambungan harus sesedikit mungkin dan bisa dinspeksi.
8. Lumpur atau endapan lainnya tidak boleh mengumpul pada pelat pemanas.
9. Tube tidak boleh mengakumulasi jelaga atau kotoran air, dan harus mempunyai toleransi ketebalan untuk keausan dan korosi.
10. Rangkaian air dan gas asap harus didesain supaya bisa memberikan kecepatan fluida maksimum tanpa mengakibatkan kerugian gesek yang besar.

### Pemilihan Ketel Uap

Pemilihan jenis dan ukuran ketel uap tergantung pada faktor-faktor berikut:

1. Daya yang diperlukan dan tekanan kerja.
2. Posisi geografi dari *power house* (sumber tenaga).
3. Ketersediaan bahan bakar dan air.
4. Kemungkinan stasiun permanen.
5. Faktor beban yang mungkin.

## Klasifikasi Ketel Uap

Ada banyak klasifikasi ketel uap, berikut ini diberikan beberapa klasifikasi ketel uap yang penting.

### 1. Berdasarkan isi tube/pipa.

(a) Pipa api atau pipa asap, dan (b) pipa air.

Pada ketel pipa api, nyala api dan gas panas yang dihasilkan pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut. Contoh ketel uap pipa air sederhana: ketel vertikal sederhana, ketel Cochran, ketel Lanchashire, ketel Cornish, ketel Scotch marine, ketel lokomotif dan ketel Velcon.

Pada ketel pipa air, air dimasukkan ke dalam pipa dimana pipa dikelilingi oleh nyala api dan gas panas dari luar. Contoh ketel jenis ini : ketel Babcock dan Wilcox, ketel Stirling, ketel La-Mont, ketel Benson, ketel Yarrow dan ketel Loeffler.

### 2. Berdasarkan posisi dapur pembakar.

(a) Dibakar di dalam, dan (b) dibakar di luar.

Pada ketel uap dibakar di dalam, dapur diletakkan di dalam kulit boiler. Sebagian besar ketel pipa api mempunyai jenis ini.

Pada ketel uap dibakar di luar, dapur disusun dibawah susunan bata. Ketel pipa air selalu dibakar di luar.

### 3. Berdasarkan sumbu shell/kulit.

(a) Vertikal, dan (b) horisontal.

Pada ketel uap vertikal, sumbu shell vertikal, sedangkan pada jenis horisontal, sumbu shellnya horisontal.

### 4. Berdasarkan jumlah pipa.

(a) Pipa tunggal, dan (b) pipa banyak.

Pada ketel uap pipa tunggal, hanya ada satu buah pipa api atau pipa air. Ketel vertikal sederhana dan ketel Cornish adalah jenis ketel pipa tunggal.

Pada ketel pipa banyak, ada dua atau lebih pipa api atau pipa air.

### 5. Berdasarkan metode sirkulasi air dan uap.

(a) Sirkulasi alami, dan (b) sirkulasi paksa.

Pada ketel dengan sirkulasi alami, sirkulasi air adalah dengan arus konveksi alami/natural, dimana dihasilkan karena pemanasan air.

Pada ketel uap dengan sirkulasi paksa, ada sirkulasi paksa pada air dengan memakai penggerak pompa. Penggunaan sirkulasi paksa dilakukan pada ketel seperti ketel La-Mont, ketel Benson, ketel Loeffler dan ketel Velcon.

6. Berdasarkan penggunaannya.

(a) Stasioner, dan (b) mobil (bergerak).

Ketel uap stasioner digunakan di pusat pembangkit tenaga, dan di industri proses. Ketel ini disebut stasioner karena ketel tidak berpindah dari satu ke tempat lainnya.

Ketel uap mobil adalah ketel yang bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya. Ketel jenis ini seperti ketel lokomotif dan ketel *marine*.

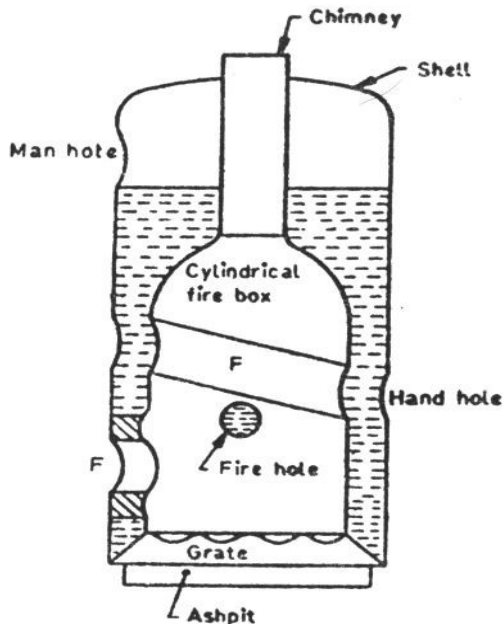
7. Berdasarkan sumber panas.

Sumber panas bisa berupa pembakaran bahan bakar padat, cair atau gas, gas sisa panas yang dihasilkan dari proses kimia, energi listrik atau energi nuklir.

### **Ketel Uap Vertikal Sederhana**

Ketel uap vertikal sederhana menghasilkan uap pada tekanan rendah dan dalam jumlah kecil. Karenanya digunakan pada pembangkit daya rendah atau pada tempat di mana ruang terbatas. Konstruksi ketel jenis ini diperlihatkan oleh gambar 1.

Ketel ini terdiri dari kulit silinder yang mengelilingi kotak api silinder. Kotak api silinder diletakkan di atasnya tempat mengalirnya uap ke permukaan. Pada dasar kotak api terdapat *grate* (panggangan). Kotak api dilengkapi dengan dua atau lebih pipa melintang miring  $F, F$ . Kemiringan bertujuan untuk menaikkan permukaan pemanasan disamping juga untuk meningkatkan sirkulasi air. Lubang tangan (*hand hole*) dibuat disamping untuk keperluan pembersihan deposit. Sebuah lubang orang (*man hole*) dibuat di atas untuk supaya orang bisa memasuki ketel untuk pembersihan. Sebuah lubang abu dibuat pada dasar ketel untuk pembuangan abu yang mengendap. Ruang antara kulit boiler dan kotak api diisi dengan air yang akan dipanaskan.



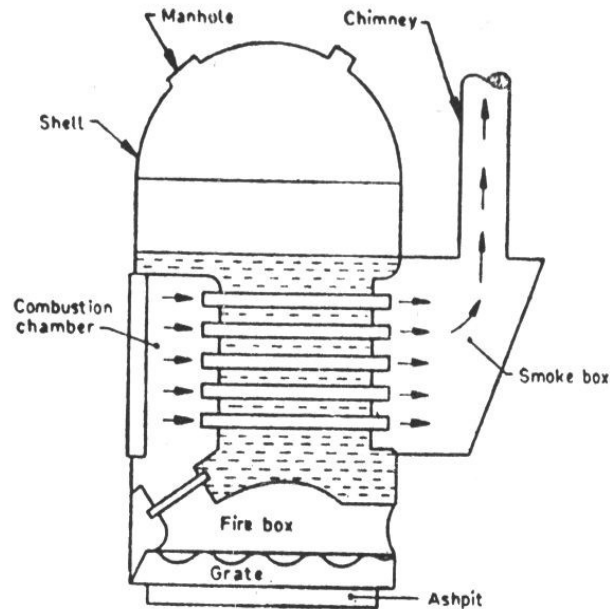
Gambar 1. Ketel vertikal sederhana.

### Ketel Uap Cochran atau Ketel Pipa Banyak Vertikal

Ada banyak desain mengenai ketel pipa banyak, ketel Cochran dianggap sebagai salah satu ketel jenis ini yang paling efisien. Ketel Cochran merupakan jenis ketel vertikal sederhana yang telah ditingkatkan.

Ketel terdiri dari kulit silinder eksternal dan kotak api seperti yang diperlihatkan gambar 2. Kulit dan kotak api keduanya berbentuk setengah bola. Mahkota setengah bola pada kulit memberikan ruang maksimum dan kekuatan maksimum untuk menahan tekanan uap di dalam ketel. Kotak api dan ruang bakar (combustion chamber) dihubungkan melalui pipa pendek. Gas asap dari ruang bakar mengalir ke kotak asap (smoke box) melalui sejumlah pipa asap. Pipa ini umumnya mempunyai diameter luar 62,5 mm dan berjumlah 165 buah. Gas dari kotak asap mengalir ke atmosfer melalui cerobong (chimney). Ruang bakar dilapisi dengan batu tahan api pada sisi kulit. Lobang orang dekat puncak mahkota kulit diperlukan untuk pembersihan.

Pada dasar kotak api terdapat panggangan (dalam hal pembakaran batubara) dan batu bara di umpan melalui lobang api (fire hole). Jika ketel digunakan untuk pembakaran bahan bakar minyak, tidak diperlukan panggangan, tetapi dasar kotak api dilapisi dengan bata tahan api. Pembakar minyak di pasang di lobang api.



Gambar 2. Ketel Cochran.

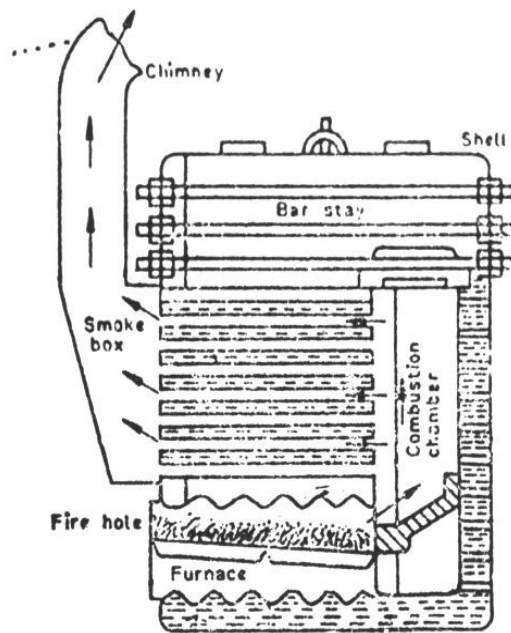
### Ketel Scotch Marine

Ketel uap marine (kapal) jenis Scotch atau tangki digunakan untuk kerja di laut karena kekompakannya, efisien dalam operasinya dan kemampuannya untuk menggunakan berbagai jenis air.

Ketel mempunyai drum dengan diameter dari 2,5 hingga 3,5 meter yang ditempatkan secara horisontal. Ketel uap ini bisa berupa ujung tunggal atau ujung ganda. Panjang ketel uap ujung tunggal bisa sampai 3,5 meter, sedangkan ujung ganda bisa sampai 6,5 meter. Ketel ujung tunggal mempunyai satu sampai empat dapur yang masuk dari sisi depan ketel. Ketel

ujung ganda mempunyai dapur pada kedua ujungnya, dan bisa mempunyai dapur dari dua sampai empat pada setiap ujung.

Ketel uap ujung tunggal Scotch marine bisa dilihat pada gambar 3. Setiap dapur mempunyai ruang bakarnya masing-masing. Terdapat pelat datar di setiap ruang bakar yaitu pelat atas, pelat bawah, dua pelat sisi dan pelat tube/pipa. Sejumlah pipa asap ditempatkan secara horisontal dan menghubungkan ruang bakar dengan cerobong. Pipa dapur, pipa asap dan ruang bakar, semuanya dikelilingi oleh air, memberikan luas permukaan pemanasan yang sangat besar. Air bersirkulasi disekeliling pipa asap. Level air dijaga sedikit diatas ruang bakar. Kotak asap (smoke box) dibuat dengan pintu untuk membersihkan pipa dan kotak asap.



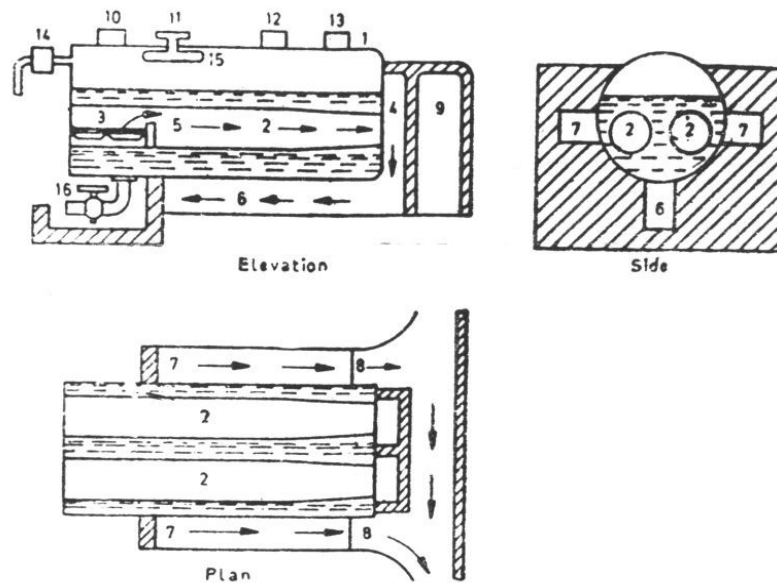
Gambar 3. Ketel Scotch marine.

### Ketel Lanchashire

Ketel ini merupakan jenis pipa api stasioner, pembakaran dalam, horisontal dan sirkulasi alami. Digunakan jika tekanan kerja dan daya yang diperlukan menengah. Ketel ini mempunyai diameter kulit silinder 1,75 hingga 2,75 meter. Panjangnya bervariasi dari 7,25 m hingga 9 m. Ketel ini

mempunyai dua pipa gas asap internal yang berdiameter kira-kira 0,4 kali dari diameter kulit. Gambar ketel ini bisa dilihat pada gambar 4.

Ketel ini terdiri dari kulit eksternal silinder panjang (1) yang terbuat dari pelat baja. Ketel mempunyai dua pipa api internal besar (2). Pipa ini diameternya mengecil pada bagian belakang untuk akses ke bagian yang lebih rendah pada ketel. Panggangan api (3) yang disebut juga dapur disediakan pada ujung pipa gas asap dimana disini bahan bakar padat dibakar. Pada ujung panggangan terdapat bata (5) yang berfungsi membelokkan gas asap ke atas. Gas asap panas setelah meninggalkan pipa gas asap internal turun ke pipa dasar (6). Gas asap ini bergerak ke depan ketel dimana alirannya terbagi dan mengalir ke lorong api sisi (7). Gas asap memasuki lorong utama (9) dan selanjutnya menuju cerobong.



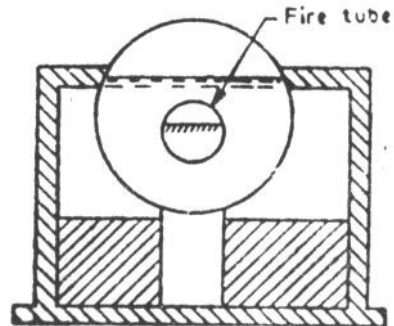
Gambar 4. Pandangan depan, sisi dan atas ketel Lancashire.

Damper (8) berguna untuk mengatur besar aliran gas asap keluar. Katup (11) berfungsi menyuplai uap ke mesin seperti yang dikehendaki. Ketel dilengkapi dengan katup pengaman pegas (10), katup pengaman jika uap tinggi dan air rendah (12). Blow off cock (16) untuk membuang lumpur dsb yang mengendap pada dasar ketel.



### Ketel Cornish

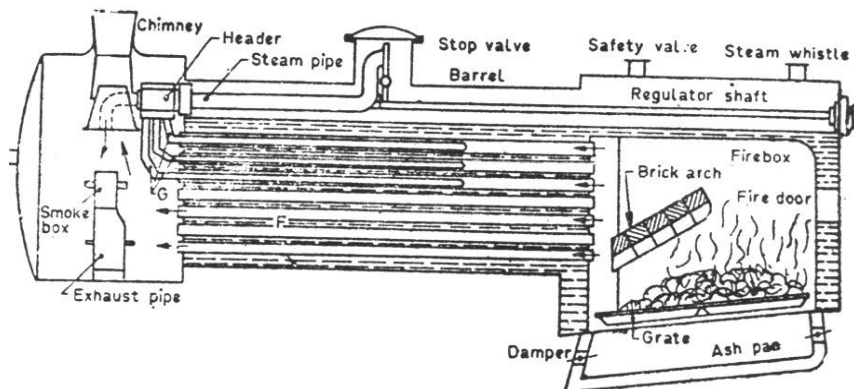
Ketel ini sejenis dengan ketel Lanchashire kecuali ia mempunyai hanya satu pipa asap. Diameter ketel cornish berkisar antara 1 m hingga 2 m dan panjang 5 m hingga 7,5 m. Kapasitas dan tekanan kerja ketel ini adalah rendah jika dibandingkan dengan ketel Lanchashire.



Gambar 5. Ketel Cornish.

### Ketel Lokomotif

Merupakan jenis ketel mobile dan pembakaran internal, horisontal banyak pipa. Prinsip ketel ini adalah menghasilkan uap dengan laju kecepatan tinggi. Jenis ketel lokomotif moderen diperlihatkan pada gambar 6.



Gambar 6. Ketel Lokomotif.

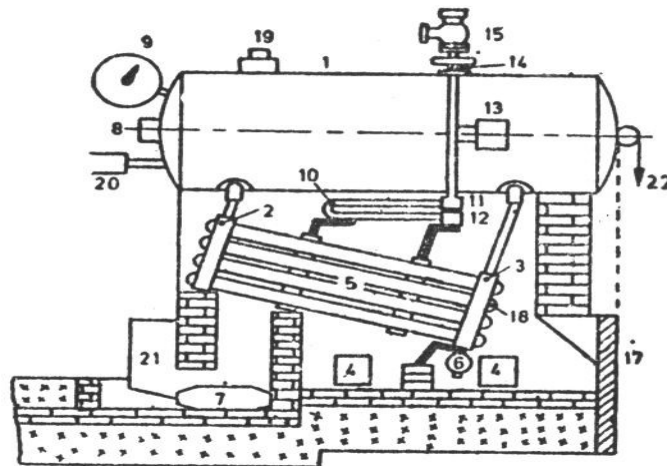
Ketel terdiri dari kulit atau *barrel* yang mempunyai diameter 1,5 m dan panjang 4 m. Batubara diumpukan ke dalam kotak api melalui pintu api dan terbakar pada panggangan. Gas asap dari panggangan dibelokkan oleh bata dan keseluruhan kotak api terpanaskan secara baik. Ada sekitar 157 pipa tipis atau pipa api *F* (diameter 47,5 mm) dan 24 buah pipa panas lanjut tebal *G* (diameter 13 cm). Gas asap setelah melewati pipa ini masuk ke kotak asap. Gas kemudian keluar ke atmosfer melewati cerobong. Barrel berisi air disekeliling pipa, dimana dipanaskan oleh gas asap dan berubah menjadi uap.

Header terbagi atas dua porsi, satu adalah ruang uap panas lanjut dan satu lagi ruang uap jenuh. Pipa uap mengarahkan uap dari regulator ke ruang uap jenuh. Kemudian uap diarahkan ke pipa panas lanjut, dan setelah melewati pipa ini, uap kembali ke ruang uap panas lanjut. Uap panas lanjut sekarang mengalir melalui pipa uap ke silinder, satu buah di setiap sisi.

Abu daripanggangan dikumpulkan pada nampan abu (*ash pan*) dan dibuang dari waktu ke waktu dengan bantuan *damper* yang dioperasikan oleh batang dan tuas.

### Ketel Babcock and Wilcox

Merupakan ketel jenis pipa lurus, stasioner, pipa air. Gambar 7 memperlihatkan ketel jenis ini.



Gambar 7. Ketel Babcock and Wilcox.

Ketel terdiri dari drum uap dan air (1). Drum dihubungkan dengan pipa pendek ke bagian atas *header* atau *riser* (2). Pipa air (5) (diameter 10 cm)

dipasang miring dan menghubungkan header atas dengan header bawah. Header dilengkapi dengan lobang tangan (*hand hole*) di depan pipa dan ditutup dengan *cap* (18).

Kotak lumpur (6) disediakan pada header bagian bawah dan lumpur yang mengendap bisa dibuang. Terdapat panggangan berantai otomatis yang bergerak lambat dimana ditempatkan batubara yang diumpun dari *hopper* (21). *Baffle* bata tahan api akan membuat gas panas bergerak naik turun dan naik lagi sampai akhirnya masuk ke cerobong. *Damper* (17) digerakkan oleh rantai (22) untuk mengatur isapan.

Ketel di keempat sisinya dikelilingi oleh dinding tahan api. Pintu (4) berguna untuk orang masuk ke ketel untuk tujuan perbaikan dan pembersihan. Air bersirkulasi dari drum (2) ke header (3) dan melalui pipa (5) ke header dan kembali ke drum. Air terus-menerus bersirkulasi seperti ini sampai air menguap. Pemanas lanjut uap (*superheater*) terdiri dari sejumlah besar pipa baja (10) dan berisi dua kotak, satu adalah kotak uap panas lanjut (11) dan satunya lagi kotak uap jenuh(12).

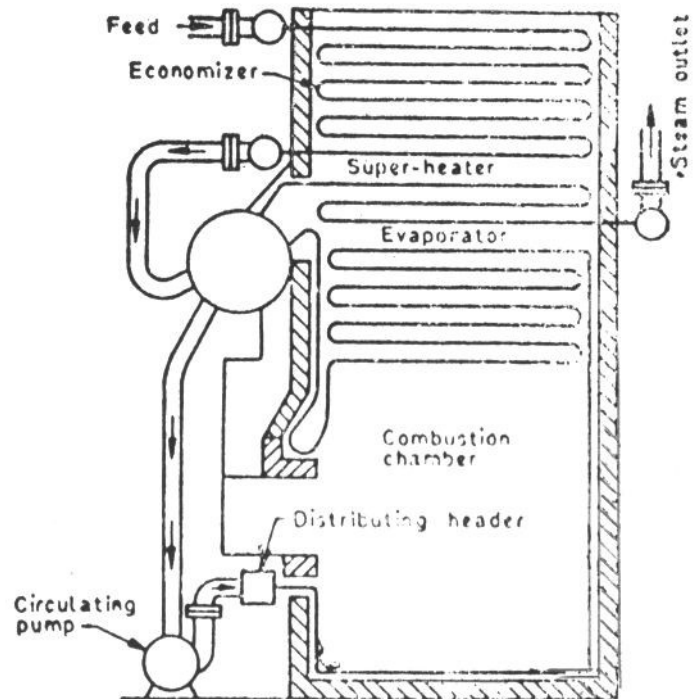
Uap yang dihasilkan diatas level air di drum mengalir di dalam pipa kering dan pipa inlet ke kotak panas lanjut (11). Kemudian uap menuju kotak uap jenuh (12) melalui (10). Uap selama mengalir melalui pipa (10) mendapat panas lanjutan sehingga menjadi uap panas lanjut. Uap kemudian diambil dari ujung pipa (14) melalui katup (15).

Ketel dilengkapi dengan berbagai fitting seperti katup pengaman (19), katup pengumpan (20), indikator ketinggian air (8) dan pengukur tekanan (9).

### **Ketel La-Mount**

Ketel ini adalah ketel moderen jenis tekanan tinggi, pipa air, bekerja dengan sirkulasi paksa. Sirkulasi diatur oleh pompa sentrifugal, digerakkan oleh turbin uap menggunakan uap dari ketel. Sirkulasi paksa menyebabkan berat air umpan (*feed water*) yang bersirkulasi ke seluruh dinding air dan drum sama dengan sepuluh kali berat uap. Ini akan mencegah pipa mendapatkan panas lebih. Skematik diagram ketel ini bisa dilihat pada gambar 8.

Air umpan mengalir melalui ekonomiser ke drum penguap. Kemudian air ditarik dengan pompa ke pipa. Pompa mendorong air ke header pada tekanan diatas tekanan drum. Header mendistribusikan air melalui nosel ke pipa pembangkit yang bekerja secara paralel. Air dan uap dari pipa ini mengalir ke drum. Uap di dalam drum kemudian diambil setelah melewati *superheater*.

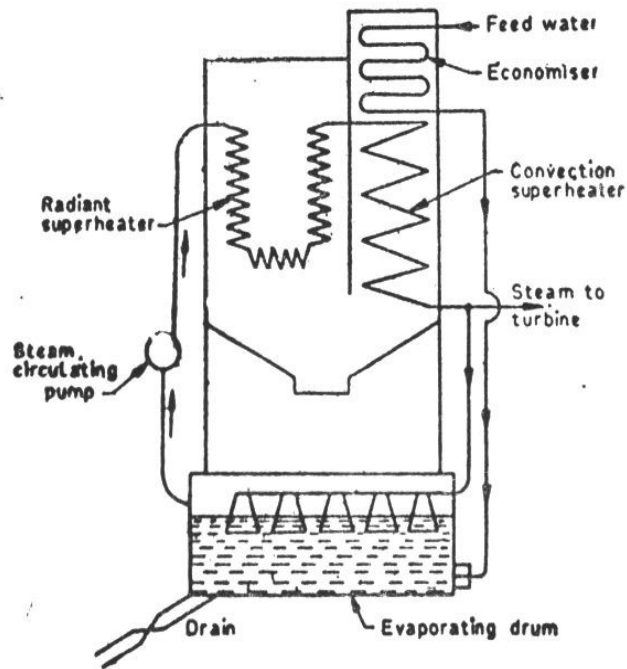


Gambar 8. Ketel La-Mount.

### Ketel Loeffler

Ketel ini adalah ketel jenis pipa air menggunakan sirkulasi paksa. Prinsip kerja utama adalah dengan menguapkan air dengan uap panas lanjut dari *superheater*. Gas panas dari dapur pemanas digunakan untuk pemanasan panas lanjut. Skema ketel ini bisa dilihat pada gambar 9.

Air umpan dari ekonomiser dipaksa bercampur dengan uap panas lanjut di dalam drum penguap (evaporating drum). Sehingga terbentuk uap jenuh, dan kemudian ditarik dari drum dengan pompa sirkulasi uap. Uap ini kemudian mengalir melalui pipa-pipa pada dinding ruang bakar memasuki *superheater*. Dari superheater, sekitar sepertiga uap panas lanjut diteruskan ke turbin dan sisanya yang dua pertiga digunakan untuk menguapkan air umpan di drum penguap.



Gambar 9. Ketel Loeffler.

### Keuntungan Dan Kerugian Ketel Pipa Air

Keuntungan-keuntungan ketel pipa air:

1. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dari pada ketel pipa api.
2. Untuk daya yang sama, menempati ruang/tempat yang lebih kecil daripada ketel pipa api.
3. Laju aliran uap lebih tinggi.
4. Komponen-komponen yang berbeda bisa diurai sehingga mudah untuk dipindahkan.
5. Permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus.
6. Pecah pada pipa air tidak menimbulkan kerusakan ke seluruh ketel.

Kerugian-kerugian ketel pipa air:

1. Air umpan mensyaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa. Jika terbentuk kerak di dalam pipa bisa menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.
2. Ketel pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati bagi penguapannya, karena itu akan menimbulkan biaya operasi yang lebih tinggi.
3. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.

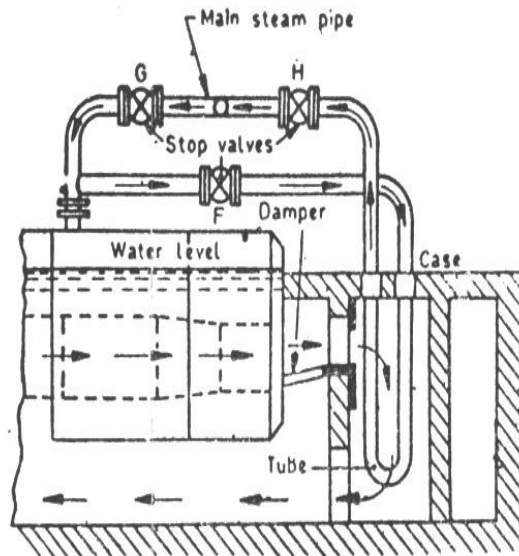
### Superheater

Superheater adalah piranti penting pada unit pembangkit uap. Tujuannya adalah untuk meningkatkan temperatur uap jenuh tanpa menaikkan tekanannya. Biasanya piranti ini merupakan bagian integral dari ketel, dan ditempatkan di jalur gas asap panas dari dapur. Gas asap ini digunakan untuk memberikan panas lanjut pada uap. Superheater *Sudgen* yang biasanya terpasang pada ketel Lanchashire diperlihatkan oleh gambar 11. Piranti ini terdiri dari dua kotak baja atau *heater* dimana bergantung padanya sekumpulan pipa lengkung berbentuk U. Ujung dari pipa-pipa ini diteruskan ke header.

Uap masuk ke ujung belakang header dan keluar diujung depan header. Panas yang berlebihan pada pipa superheater dicegah dengan menggunakan *damper* penyeimbang yang dioperasikan dengan handel.

Superheater bekerja jika damper pada posisi yang ditunjukkan gambar. Jika damper pada posisi vertikal, gas akan lewat langsung di dasar tanpa melewati pipa-pipa superheater. Pada kondisi ini maka superheater tidak bekerja.

Perlu dicatat bahwa jika superheater bekerja, katup *G* dan *H* dalam kondisi terbuka dan katup *F* tertutup. Jika uap diambil langsung dari ketel, katup *G* dan *H* tertutup dan katup *F* terbuka.



Gambar 11. Superheater.

### Ekonomiser

Ekonomiser adalah piranti yang digunakan untuk memanaskan air umpan dengan memanfaatkan panas dari gas asap sebelum masuk ke cerobong. Ekonomiser akan meningkatkan nilai ekonomis ketel uap. Jenis ekonomiser yang populer adalah ekonomiser “Greans” dan banyak digunakan pada ketel stasioner. Ekonomiser ini terdiri dari sejumlah besar pipa vertikal yang ditempatkan sebagai penambahan gas asap antara ketel dengan cerobong seperti terlihat pada gambar 12. Pipa-pipa ini mempunyai panjang 2,75 m, diameter luar 11,4 cm dan tebal 11,5 mm dari bahan besi tuang.

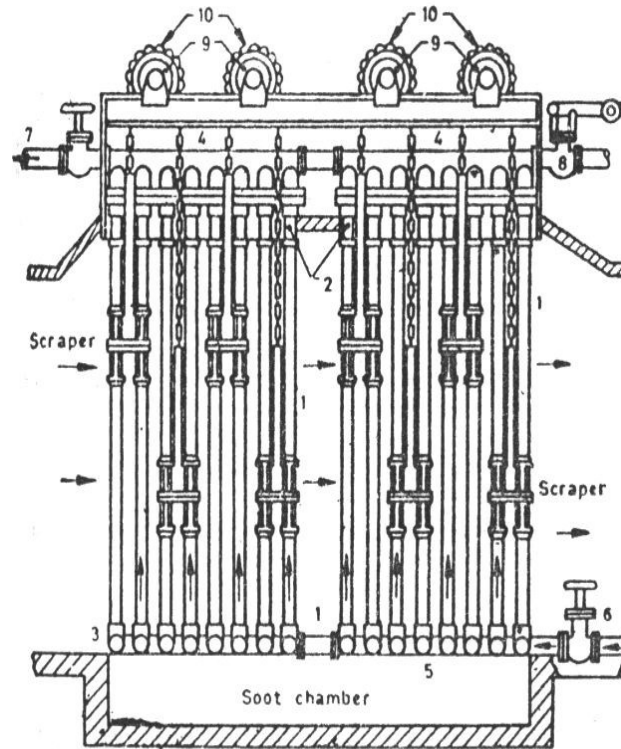
Ekonomiser dibuat dalam seksi tegak. Setiap seksi umumnya terdiri dari enam atau delapan pipa vertikal (1). Pipa-pipa ini disambung ke pipa atau kotak horisontal (2) diatas dan (3) dibawah. Kotak atas (2) dari seksi yang berbeda disambung dengan pipa (4), sedangkan kotak bawah disambungkan ke pipa (5).

Air umpan dipompa ke ekonomiser pada (6) dan memasuki pipa (5). Kemudian air masuk ke dalam kotak bawah (3) dan kemudian ke dalam

kotak atas (2) melalui pipa (1). Air kemudian diarahkan pipa (4) ke pipa (7) dan kemudian ke ketel.

Perlu dicatat bahwa temperatur air umpan tidak boleh kurang dari 35 °C, jika tidak ada bahaya korosi disebabkan oleh uap air di gas asap mengendap di pipa dingin. Berikut ini adalah keuntungan-keuntungan menggunakan ekonomiser:

1. Ada penghematan batubara 15 sampai 20%.



Gambar 12. Ekonomiser.

2. Meningkatkan kapasitas menghasilkan uap karena memperpendek waktu yang diperlukan untuk merubah air ke uap.
3. Mencegah pembentukan kerak di dalam pipa air ketel, sebab kerak sekarang mengendap di pipa ekonomiser yang bisa dengan mudah dibersihkan.



4. Karena air umpan memasuki ketel panas, sehingga regangan karena ekspansi yang tidak sama bisa diminimasi.

### Unjuk Kerja Ketel Uap

#### 1. Penguapan Ekivalen:

Jika sejumlah air diuapkan dari air umpan pada  $100^{\circ}\text{C}$  dan menghasilkan uap jenuh dan kering pada  $100^{\circ}\text{C}$  dan tekanan atmosfer, biasanya dinyatakan dengan *dari dan pada  $100^{\circ}\text{C}$* .

Jika air sudah berada pada temperatur didihnya, maka panas yang dibutuhkan air hanyalah panas laten pada tekanan  $1,033\text{ kg/cm}^2$  untuk merubahnya ke dalam bentuk uap pada temperatur  $100^{\circ}\text{C}$ . Harga kalor laten ini diambil  $539,0\text{ kcal/kg}$ . Secara matematik, penguapan ekivalen “dari dan pada  $100^{\circ}\text{C}$ ”:

$$E = \frac{\text{kalor total yang diperlukan untuk menguapkan air}}{539,0}$$

Misalkan  $t_1$  = temperatur air umpan dalam  $^{\circ}\text{C}$

$h_1$  = kalor sensibel/nyata air umpan dalam kcal/kg uap

bersesuaian dengan  $t_1$

$H$  = kalor total uap dalam kcal/kg uap pada tekanan

kerjanya

$= h + xL$  ... untuk uap basah

$= h + L$  ... untuk uap kering

$= h + L + C_p(t_{sup} - t_{sat})$  ... untuk uap panas lanjut

$W_e$  = berat air yang diuapkan atau jumlah uap yang dihasilkan

dalam kg/h atau kg/kg bahan bakar yang dibakar

Kalor yang diperlukan untuk menguapkan 1 kg air:

$$= H - h_1$$

dan

$$E = \frac{W_e [H - h_1]}{539,0}$$

- Catatan. 1. Faktor  $(H - h_1)/539,0$  disebut juga sebagai faktor penguapan, dan biasanya dilambangkan dengan  $F_e$ . Harganya selalu lebih besar dari satu untuk semua ketel uap.
2. Dalam satuan SI, harga kalor laten pada temperatur  $100^\circ \text{C}$  adalah  $2256,9 \text{ kJ/kg}$ .

## 2. Efisiensi Ketel:

Adalah rasio panas yang digunakan dalam memproduksi uap terhadap panas yang dihasilkan dapur. Secara matematik:

$$\eta = \frac{\text{Kalor yang digunakan untuk menghasilkan uap}}{\text{kalor yang dihasilkan dapur}}$$

$$\eta = \frac{W_e [H - h_1]}{C}$$

dimana :  $W_e$  = berat air sebenarnya menguap atau penguapan sebenarnya dalam kg/kg bahan bakar

$C$  = nilai kalor bahan bakar dalam kcal/kg bahan bakar.

Jika  $W_s$  adalah berat air yang diuapkan dalam kg dan  $W_f$  adalah berat bahan bakar yang digunakan dalam kg, maka:

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} \quad \text{kg/kg bahan bakar}$$

dan,

$$\eta = \frac{W_s (H - h_1)}{W_f \times C}$$

Catatan: jika ketel terdiri dari ekonomiser dan superheater, dianggap sebagai unit tunggal, kemudian efisiensi adalah efisiensi keseluruhan ketel.

### 3. Daya Ketel:

American Society of Mechanical Engineers (ASME) menentukan bahwa **satu daya kuda ketel** adalah ekuivalen dengan penguapan 15,653 kg air per jam dari dan pada 100 °C.

Secara matematik:

$$\text{Daya ketel} = \frac{W_e(H - h_1)}{539,0 \times 15,563} \text{ hp}$$

dimana,  $W_e$  = berat air yang sebenarnya menguap

$H$  = kalor total uap yang dihasilkan

$h_1$  = Kalor sensibel/nyata air umpan

### Contoh Soal

Sebuah ketel uap menguapkan 3,6 kg air per kg bahan bakar batubara menjadi uap jenuh kering pada tekanan 10 kg/cm<sup>2</sup> absolut. Temperatur air umpan adalah 32<sup>o</sup> C. Carilah penguapan ekuivalen “dari dan pada 100<sup>o</sup> C” dan juga faktor penguapan.

Jawab:

Diketahui:

$$W_e = 3,6 \text{ kg/kg batubara}$$

$$\text{Tekanan uap} = 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ absolut}$$

$$\text{Temperatur air umpan, } t_1 = 32^0 \text{ C}$$

*Penguapan ekuivalen “dari dan pada 100<sup>o</sup> C”*

Misalkan  $E$  = penguapan ekuivalen “dari dan pada 100<sup>o</sup> C”

Kalor sensibel/nyata air pada 32<sup>o</sup> C (dari tabel uap):

$$h_1 = 32,0 \text{ kcal/kg}$$

Pada tekanan 10 kg/cm<sup>2</sup> absolut, dari tabel uap diperoleh:

$$H = 663,3 \text{ kcal/kg}$$

Penguapan ekuivalen:

$$E = \frac{W_e(H-h_1)}{539,0} = \frac{3,6(663,3-32,0)}{539,0} = 4,2 \text{ kg}$$

*Faktor penguapan*

Misalkan  $F_e$  = faktor penguapan

$$F_e = \frac{H-h_1}{539,0} = \frac{663,3-32,0}{539,0} = 1,17$$

### Contoh soal

Observasi berikut dilakukan pada pembangkit ketel uap selama uji satu jam:

- tekanan uap : 20 bar
- Temperatur uap : 260<sup>0</sup> C
- Uap yang dihasilkan : 37.500 kg
- Temperatur air memasuki ekonomiser : 15<sup>0</sup> C
- Temperatur air meninggalkan ekonomiser : 90<sup>0</sup> C
- Bahan bakar yang digunakan: 4.400 kg
- Energi pembakaran bahan bakar: 30.000 kJ/kg

Hitunglah:

- a. Penguapan ekivalen per kg bahan bakar
- b. Efisiensi termal pembangkit
- c. Persen energi panas dari bahan bakar yang terpakai oleh ekonomiser.

Jawab:

Diketahui: Tekanan uap = 20 bar

Temperatur uap,  $t_{sup} = 260^0 \text{ C}$

Berat uap yang dihasilkan,  $W_s = 37.500 \text{ kg/h}$

Temperatur air memasuki ekonomiser,  $t_1 = 15^0 \text{ C}$

Dari tabel uap diperoleh kalor sensibel air:

$$h_1 = 62,9 \text{ kJ/kg}$$

Temperatur air meninggalkan ekonomiser,  $t_2 = 90^0 \text{ C}$

Dari tabel uap, kalor sensibel air meninggalakn ekonomiser:

$$h_2 = 376,9 \text{ kJ/kg}$$

Berat bahan bakar,  $W_f = 4.400 \text{ kg/h}$

Energi pembakaran bahan bakar,  $C = 30.000 \text{ kJ/kg}$

a. *Penguapan ekuivalen per kg bahan bakar*

Dari tabel uap, untuk tekanan 20 bar diperoleh:

$$h = 908,6 \text{ kJ/kg}; L = 1.886,6 \text{ kJ/kg}; t_s = 212,4^\circ \text{ C}$$

Berat air yang diuapkan:

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} = \frac{37.500}{4.400} = 8,52 \text{ kg/kg bahan bakar}$$

dan kalor total dalam 1 kg uap panas lanjut (dengan mengasumsikan  $C_p = 2,0$ ) :

$$\begin{aligned} H_{sup} &= h + L + C_p (t_{sup} - t_s) \text{ kJ} \\ &= 908,6 + 1.886,6 + 2 (260 - 212,4) \text{ kJ} \\ &= 2.890,4 \text{ kJ} \end{aligned}$$

maka:

$$\begin{aligned} E &= \frac{W_e (H_{sup} - h_1)}{2.256,9} \\ &= \frac{8,52(2.890,2 - 62,9)}{2.256,9} = 10,7 \text{ kg} \end{aligned}$$

b. *Efisiensi termal pembangkit*

Misalkan  $\eta$  = efisiensi termal pembangkit

maka:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_e (H_{sup} - h_1)}{C} \\ &= \frac{8,52(2.890,4 - 62,9)}{30.000} = 0,803 \\ &= 80,3 \% \end{aligned}$$

c. *Persentase energi panas yang dipakai oleh ekonomiser*

Kalor yang dipakai oleh ekonomiser per kg bahan bakar:

$$= W_e (h_2 - h_1) = 8,52 (376,9 - 62,9) \text{ kJ}$$

$$= 2675 \text{ kJ}$$

Persentase kalor yang dipakai ekonomiser:

$$= \frac{2.675}{30.000} = 0,089 = 8,9$$

### Contoh soal

Ketel uap Lancashire menghasilkan 2.400 kg uap kering per jam pada tekanan 11 kg/cm<sup>2</sup> absolut. Luas area panggangan adalah 3 m<sup>2</sup> dan sebanyak 90 kg batubara dibakar per m<sup>2</sup> panggangan per jam. Harga nilai kalor batubara adalah 7.900 kcal/kg dan temperatur air umpan adalah 17,5<sup>0</sup> C. Carilah : (a) Penguapan aktual per kg batubara, (b) Daya ketel, (c) Efisiensi ketel.

Jawab

Diketahui: berat uap yang dihasilkan,  $W_s = 2.400 \text{ kg}$

Tekanan uap = 11 kg/cm<sup>2</sup> absolut

Luas panggangan = 3 m<sup>2</sup>

Maka berat batubara yang dibakar:

$$W_f = 3 \times 90 = 270 \text{ kg}$$

Nilai kalori bahan bakar,  $C = 7.900 \text{ kcal/kg}$  batubara

Temperatur air umpan,  $t_1 = 17,5^0 \text{ C}$

Maka kalor sensibel air umpan pada 17,5<sup>0</sup> C adalah (dari tabel uap):

$$h_1 = 17,5 \text{ kcal/kg}$$

a. Penguapan aktual per kg batubara

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} = \frac{2.400}{270} = 8,89 \text{ kg}$$

b. Daya ketel

Dari tabel uap, pada tekanan 11 kg/cm<sup>2</sup> abs, kita dapatkan:

$$H = 664,1 \text{ kcal/kg}$$

Daya ketel:

$$\begin{aligned} &= \frac{W_e(H-h_1)}{539,0 \times 15,563} \\ &= \frac{8,89(664,1-17,5)}{539,0 \times 15,563} = 0,69 \text{ hp} \end{aligned}$$

c. Efisiensi ketel

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_e(H-h_1)}{C} \\ &= \frac{8,89(664,1-17,5)}{7.900} = 0,728 = 72,8 \text{ \%} \end{aligned}$$

**Soal-soal**

1. Apakah yang dimaksud dengan ketel uap? Bagaimana ketel diklasifikasikan?
2. Terangkan prinsip kerja ketel pipa api dan ketel pipa air.
3. Terangkanlah secara singkat tentang ketel Lanchashire dengan bantuan diagram.
4. Uraikan dengan sketsa cara kerja ketel uap lokomotif.
5. Boiler berbahan bakar batubara mengkonsumsi batubara 400 kg per jam. Boiler menguapkan 3200 kg air pada  $44,5^{\circ}\text{C}$  ke uap panas lanjut pada tekanan  $12\text{ kg/cm}^2$  abs dan  $274,5^{\circ}\text{C}$ . Jika nilai kalor bahan bakar adalah  $7.800\text{ kcal/kg}$ , carilah: (a) penguapan ekuivalen dari dan pada  $100^{\circ}\text{C}$ , (b) efisiensi termal boiler.
6. Data berikut berkaitan dengan pembangkit uap yang terdiri dari boiler, ekonomiser dan superheater.
  - tekanan uap :  $14\text{ kg/cm}^2$  abs
  - berat uap yang dihasilkan :  $5.000\text{ kg/hr}$
  - berat batubara yang digunakan :  $675\text{ kg/hr}$
  - nilai kalor batubara :  $7.100\text{ kcal/kg}$
  - temperatur air umpan memasuki ekonomiser :  $30^{\circ}\text{C}$
  - temperatur air umpan meninggalkan ekonomiser :  $130^{\circ}\text{C}$
  - fraksi kekeringan uap meninggalkan boiler =  $0,97$
  - temperatur uap air meninggalkan superheater =  $320^{\circ}\text{C}$
 Carilah (a) efisiensi keseluruhan pembangkit, (b) persentase kalor yang tersedia yang digunakan di boiler, ekonomiser, dan superheater.
7. Sebuah boiler menghasilkan  $4\text{ kg}$  uap per  $\text{kg}$  batubara dari air umpan dengan suhu  $45^{\circ}\text{C}$ . Tekanan uap adalah  $10,5\text{ kg/cm}^2$  abs. Jika fraksi kekeringan uap  $0,98$ , carilah penguapan ekuivalen dari dan pada  $100^{\circ}\text{C}$ .