

DIKTAT KULIAH
TERMODINAMIKA TEKNIK II



TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
2005

DIKTAT KULIAH

TERMODINAMIKA TEKNIK II

Disusun :

ASYARI DARAMI YUNUS

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Untuk memenuhi buku pegangan dalam perkuliahan, terutama yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, maka kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku/diktat yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin. Kali ini penulis menyiapkan diktat yang ditujukan untuk mata kuliah Termodinamika Teknik II.

Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan materinya dengan kurikulum di jurusan Teknik Mesin, Universitas Darma Persada Indonesia.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Termodinamika Teknik II, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini.

Jakarta, Desember 2005

Ir. Asyari D. Yunus SE. MSc.

DAFTAR ISI

BAB 1. Sistem Tenaga Uap. 1

BAB 2. Sistem Tenaga Gas. 18

BAB 3. Sistem Refrigerasi Dan Pompa Kalor. 51

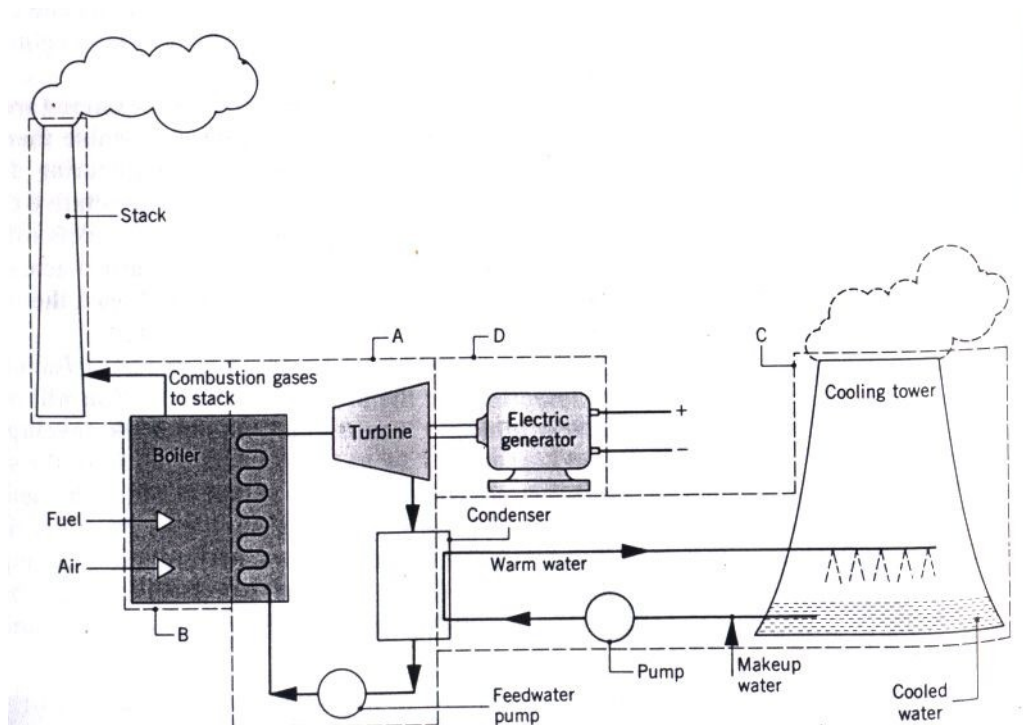
BAB 4. Campuran Gas Ideal Tak Bereaksi Dan Psikrometrik. 65

BAB 5. Campuran Bereaksi : Pembakaran. 85

BAB I

SISTEM TENAGA UAP

Skema sederhana sistem daya uap sederhana ditunjukkan oleh gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Komponen-komponen pembangkit daya uap sederhana.

- A. Sistem turbin uap
- B. Suplai energi
- C. Sirkuit pendinginan air
- D. Generator listrik

SIKLUS RANKINE

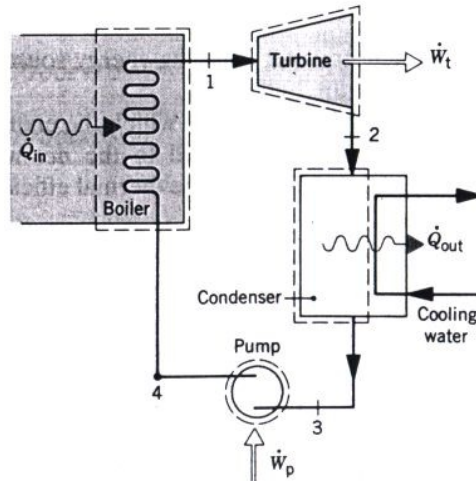
Prinsip Kerja dan Perpindahan Kalor :

Gambar 2 memperlihatkan prinsip kerja dan perpindahan kalor sub-sistem A.

Dalam hal ini berlaku:

- Perpindahan energi sesuai arah panah dan dianggap positif.

- Perpindahan kalor yang tidak dikehendaki ke lingkungan diabaikan.
- Perubahan energi potensial dan kinetik diabaikan.
- Setiap komponen beroperasi pada kondisi *steady state*.



Gambar 2. Prinsip kerja dan perpindahan kalor dari sub-sistem A.

Pada turbin :

Uap dari boiler pada kondisi 1 yang mempunyai temperatur dan tekanan tinggi mengalami ekspansi didalam turbin sehingga menghasilkan kerja dan kemudian uap keluar dari turbin pada kondisi 2 dengan tekanan yang lebih rendah.

Keseimbangan energi :

$$0 = \cancel{\dot{Q}_{cv}} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

dimana :

\dot{m} = laju aliran massa fluida kerja

\dot{W}_t / \dot{m} = laju kerja yang dibangkitkan persatuan massa

h_1 = entalpi pada titik 1

h_2 = entalpi pada titik 2

V_1 = kecepatan fluida pada titik 1

V_2 = kecepatan fluida pada titik 2

z_1 = ketinggian pada titik 1

z_2 = ketinggian pada titik 2

g = gravitasi

Pada Kondenser :

Terjadi perpindahan kalor dari uap ke aliran air pendingin pada aliran yang terpisah. Sehingga uap mengkondensasi dan air mengalami kenaikan suhu. Cairan yang terkondensasi meninggalkan kondenser pada keadaan 3. Pada kondisi *steady state* keseimbangan laju energi dan massa pada bagian kondensasi :

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

Dimana : $\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}$ = laju energi yang dipindahkan oleh kalor dari fluida

kerja ke air pendingin per satuan massa.

Pada Pompa :

Cairan pada titik 3 dipompa ke boiler melalui pompa antara titik 3 dan 4. Keseimbangan massa dan energi :

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3$$

dimana : $\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}$ = laju daya input per unit massa pada pompa

Pada Boiler :

Fluida kerja melengkapi siklus ketika fluida memasuki boiler pada keadaan 4 dan keluar pada keadaan 1. Keseimbangan massa dan energi :

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

Dimana : $\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}$ = laju perpindahan energi dari sumber energi ke fluida kerja persatuan massa yang masuk ke boiler.

EFISIENSI TERMAL

adalah jumlah energi yang diberikan ke fluida kerja pada boiler yang dirubah ke kerja output.

$$\eta = \frac{\dot{W}_t / \dot{m} - \dot{W}_p / \dot{m}}{\dot{Q}_{in} / \dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

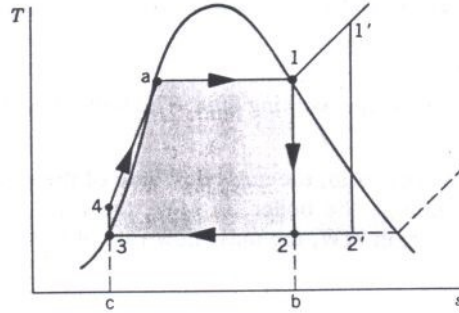
Kerja bersih output sama dengan kalor bersih input, maka:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\dot{Q}_{in} / \dot{m} - \dot{Q}_{out} / \dot{m}}{\dot{Q}_{in} / \dot{m}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out} / \dot{m}}{\dot{Q}_{in} / \dot{m}} \\ &= 1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \end{aligned}$$

Cara lain untuk menerangkan unjuk kerja pembangkit adalah dengan parameter *back work ratio*, *bwr* (rasio kerja balik) yang didefinisikan sebagai rasio input kerja pompa terhadap kerja yang dihasilkan oleh turbin.

$$bwr = \frac{\dot{W}_p / \dot{m}}{\dot{W}_t / \dot{m}} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)}$$

Siklus Ideal Rankine



Gambar 3. Diagram Temperatur – entropi untuk siklus Rankine ideal.

Proses 1-2 : ekspansi isentropik fluida kerja pada turbin dari uap jenuh pada keadaan 1 ke tekanan kondenser

Proses 2-3 : perpindahan kalor dari fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui kondenser dengan cairan jenuh pada keadaan 3.

Proses 3-4 : kompresi isentropik didalam pompa ke keadaan 4 di daerah cairan terkompresi

Proses 4-1 : perpindahan kalor ke fluida kerja ketika mengalir pada tekanan konstan melalui boiler untuk menyelesaikan siklus.

Siklus ideal Rankine juga meliputi kemungkinan pemanasan lanjut /superheat uap seperti yang digambarkan pada siklus 1'-2'-3-4-1'. Kerja pompa bisa juga dicari dengan rumus :

$$\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} \right)_{intrev} = \int_3^4 v dp$$

notasi *int rev* menerangkan bahwa proses reversibel internal pada pompa.

Dengan mengintegrasikan persamaan diatas:

$$\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)_{intrev} = v_3(p_4 - p_3)$$

Pengaruh Tekanan Boiler Dan Kondenser Pada Siklus Rankine

Dari gambar T-S diagram siklus Rankine ideal luas daerah 1-b-c-4-a-1 adalah menyatakan perpindahan kalor kedalam fluida kerja per satuan massa pada boiler. Dirumuskan :

$$\left(\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}\right)_{intrev} = \int_4^1 T ds = \text{luas } 1 - b - c - 4 - a - 1$$

Integral diatas bisa ditulis dalam bentuk suhu rata-rata pertambahan kalor, \bar{T}_{in} , sebagai berikut :

$$\left(\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}\right)_{intrev} = \bar{T}_{in}(s_1 - s_4)$$

dimana tanda strip diatas menunjukkan harga rata-rata.

Dengan cara yang sama , luas daerah 2-b-c-3-2 mewakili perpindahan kalor dari uap terkondensasi persatuan massa yang melalui kondenser, dirumuskan:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}\right)_{intrev} &= T_{out}(s_2 - s_3) = \text{luas } 2 - b - c - 3 - 2 \\ &= T_{out}(s_1 - s_4) \end{aligned}$$

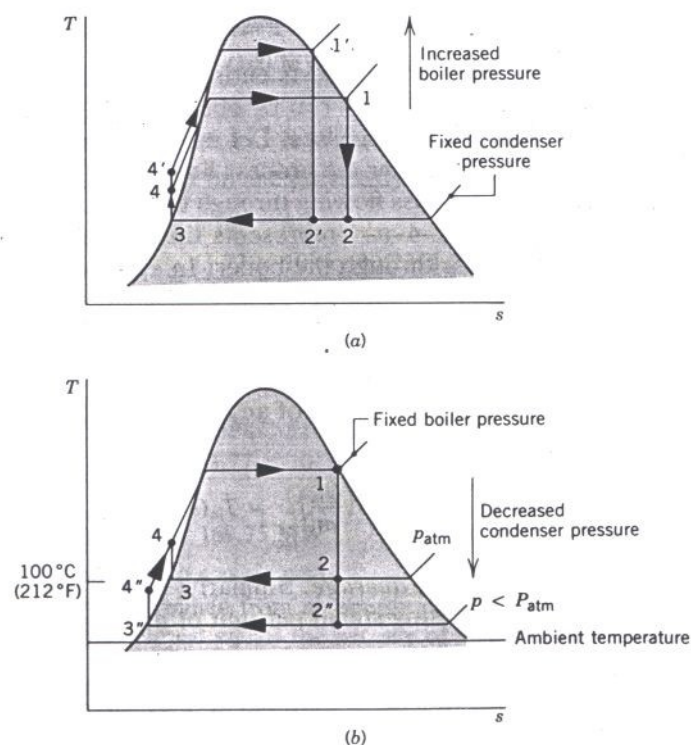
dimana T_{out} menunjukkan suhu pada sisi uap pada kondenser.

Efisiensi Thermal siklus Rankine ideal dalam variabel perpindahan kalor adalah :

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{(\dot{Q}_{out}/\dot{m})_{int_{rev}}}{(\dot{Q}_{in}/\dot{m})_{int_{rev}}} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa efisiensi termal siklus ideal akan naik ketika suhu rata-rata, pada tempat dimana energi ditambahkan karena perpindahan kalor, juga naik dan/atau suhu, dimana energi dibuang, menurun.

Persamaan efisiensi diatas bisa digunakan untuk mempelajari pengaruh dari perubahan unjuk kerja boiler dan kondenser.



Gambar 4. Pengaruh variasi tekanan kerja pada siklus Rankine ideal. (a). Pengaruh tekanan boiler. (b). Pengaruh tekanan kondenser.

Gambar A. memperlihatkan dua siklus ideal yang mempunyai tekanan kondenser sama tetapi tekanan boiler berbeda. Suhu rata-rata dari kalor yang

ditambahkan terlihat lebih besar pada siklus 1'-2'-3-4'-1' daripada siklus 1-2-3-4-1. Sehingga kenaikan tekanan boiler akan menaikkan efisiensi termal siklus Rankine.

Gambar B. memperlihatkan dua siklus yang mempunyai tekanan boiler sama tetapi tekanan kondenser yang berbeda. Satu kondenser beroperasi pada tekanan atmosfer dan yang lainnya mempunyai tekanan kurang dari tekanan atmosfer. Suhu kalor yang dibuang pada siklus 1-2-3-4-1 adalah 100 °C. Suhu kalor yang dilepas pada siklus 1-2"-3"-4"-1 adalah lebih rendah, karena itu mempunyai efisiensi termal yang lebih besar. Jadi penurunan tekanan kondenser akan meningkatkan efisiensi termal.

Tekanan kondenser yang paling rendah yang mungkin adalah tekanan jenuh/saturasi pada suhu ambien/batas. Ini adalah suhu yang paling rendah yang paling mungkin dilepas ke lingkungan. Alasan utama kenapa menggunakan kondenser pada pembangkit adalah untuk menjaga tekanan gas serendah mungkin pada turbin (pembangkit). Penambahan kondenser juga memungkinkan fluida kerja mengalir dalam loop tertutup.

Prinsip-prinsip Ireversibilitas Dan Kerugian

Ireversibilitas dan kerugian ditemukan pada ke empat subsistem pembangkit daya uap. Ireversibilitas yang dialami pada fluida kerja disebabkan oleh ekspansi pada turbin. Sebagaimana digambarkan pada grafik berikut ini, proses 1-2 adalah ekspansi adiabatik pada turbin yang disertai dengan kenaikan entropi. Kerja yang dihasilkan pada langkah ini lebih kecil bila dibandingkan pada proses ekspansi isentropik 1-2s.

Efisiensi turbin isentropik :

$$\eta_T = \frac{(\dot{W}_T / \dot{m})}{(\dot{W}_T / \dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

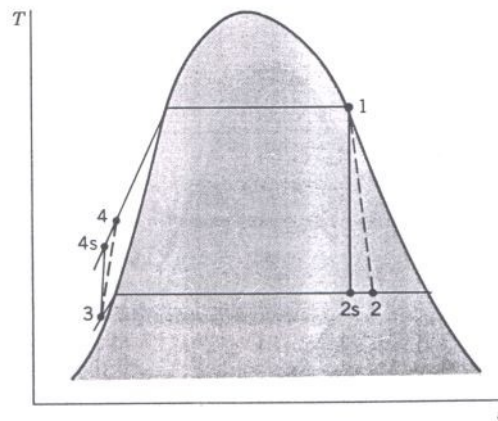
Input kerja pada pompa untuk mengatasi efek gesekan juga akan mengurangi daya output pembangkit. Akan ada kenaikan entropi pada pompa. Proses 3-4

mewakili proses pemompaan sebenarnya. Daya input ke pompa akan menjadi lebih besar pada proses 3-4 dibandingkan proses isentropik 3-4s.

Efisiensi pompa isentropik :

$$\eta_p = \frac{(\dot{W}_p / \dot{m})_s}{(\dot{W}_p / \dot{m})} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

Ireversibilitas pada pompa mempunyai dampak yang lebih kecil pada kerja pembangkit bila dibandingkan terhadap ireversibilitas pada turbin.



Gambar 6. Diagram Temperatur – entropi yang menunjukkan pengaruh ireversibilitas pada turbin dan pompa.

SUPERHEAT DAN REHEAT

Superheat adalah proses dimana uap air sebelum memasuki turbin berada pada kondisi panas lanjut (superheat).

Untuk mendapatkan kondisi ini biasanya uap dipanaskan dengan alat yang bernama *superheater*.

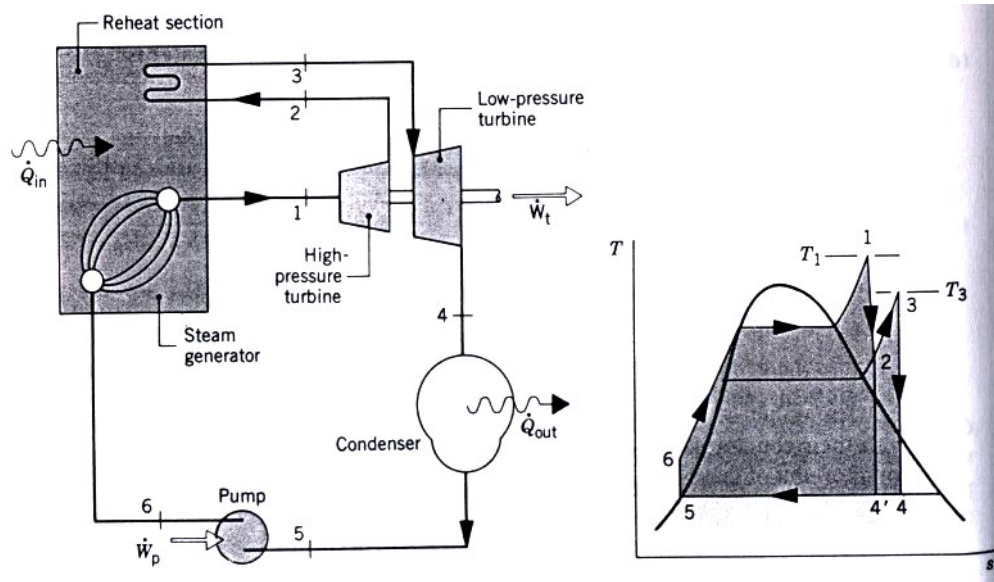
Kombinasi boiler dengan superheater disebut *steam generator*.

Efisiensi termal dengan uap superheat lebih tinggi dari yang tanpa superheat karena temperatur rata-rata kalor yang masuk lebih tinggi.

Reheat merupakan modifikasi sistem superheat dimana uap tidak berkespansi pada turbin ke tekanan kondenser melainkan pertama-tama uap

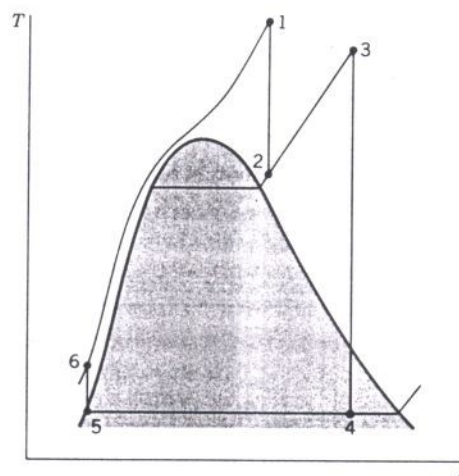
berekspansi pada turbin pertama ke tekanan antara *steam generator* dan tekanan kondenser, kemudian uap dipanaskan, setelah itu uap berekspansi pada turbin tingkat kedua sampai tekanan kondenser.

Tujuan reheat adalah meningkatkan kualitas uap pada sisi keluar turbin.



Gambar 7. Siklus *Reheat* Ideal.

Siklus reheat ideal superkritis diperlihatkan pada gambar berikut dimana tidak ada perubahan fasa yang terjadi selama pemberian kalor dari 6 ke 1.

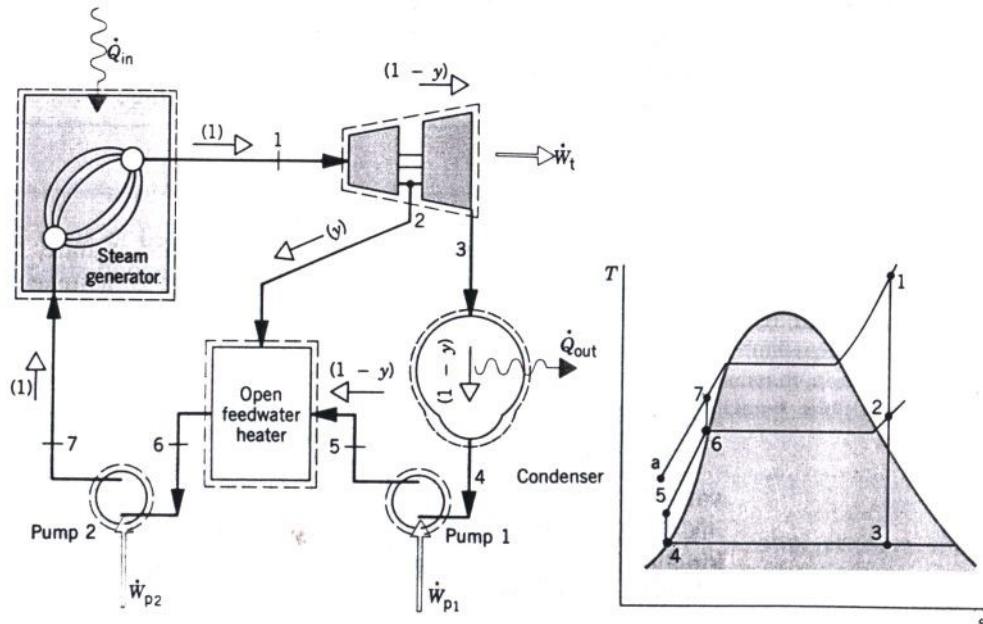


Gambar 8. Siklus reheat ideal *superkritis*.

SIKLUS DAYA UAP REGENERATIF

Tujuan siklus ini adalah meningkatkan temperatur rata-rata air yang masuk kedalam boiler.

Pemanas/heater Air Umpan Terbuka



Gambar 9. Siklus daya uap regeneratif dengan pemanas air umpan terbuka.

Regenerasi dilakukan dengan menggunakan heater air umpan, yaitu sebuah penukar kalor (heat exchanger) jenis kontak dimana aliran dari suhu yang berbeda bercampur sehingga menghasilkan aliran dengan temperatur menengah.

Uap masuk ke turbin tingkat pertama pada kondisi 1 dan berekspansi ke kondisi 2 dimana sejumlah aliran diambil dan dimasukkan ke heater air umpan terbuka pada tekanan p_2 . Sisa uap akan memasuki turbin tingkat kedua menuju ke tingkat 3. Uap yang berupa cairan jenuh ini kemudian dipompa dari kondisi 4 ke heater air umpan pada kondisi 5. Dari heater keluar aliran yang sudah bercampur untuk kemudian dipompa ke boiler.

Pada siklus ini energi diberikan pada dari kondisi 7 ke kondisi 1 dan bukan dari kondisi a ke 1 sehingga jumlah energi untuk memanaskan air bisa dikurangi.

Laju massa :

$$m_2 + m_3 = m_1$$

dimana :

m_1 = laju massa memasuki turbin tingkat pertama

m_2 = laju massa yang diambil dan keluar pada kondisi 2

m_3 = laju massa yang memasuki turbin tingkat kedua

Dengan membagi dengan m_1 maka :

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1$$

fraksi aliran yang diambil/dibelokkan pada kondisi 2 adalah y ($y = m_2 / m_1$), maka fraksi aliran total yang melalui turbin tingkat kedua :

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1 - y$$

Dengan mengasumsikan bahwa tidak ada energi yang berpindah dari heater ke lingkungan dan mengabaikan efek energi potensial dan energi kinetik maka kesetimbangan energi menjadi :

$$0 = yh_2 + (1 - y)h_3 - h_6$$

$$y = \frac{h_6 - h_3}{h_2 - h_3}$$

Kerja total turbin :

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3)$$

Kerja pompa :

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}_1} = (h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4)$$

Energi yang ditambahkan pada generator uap :

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_7)$$

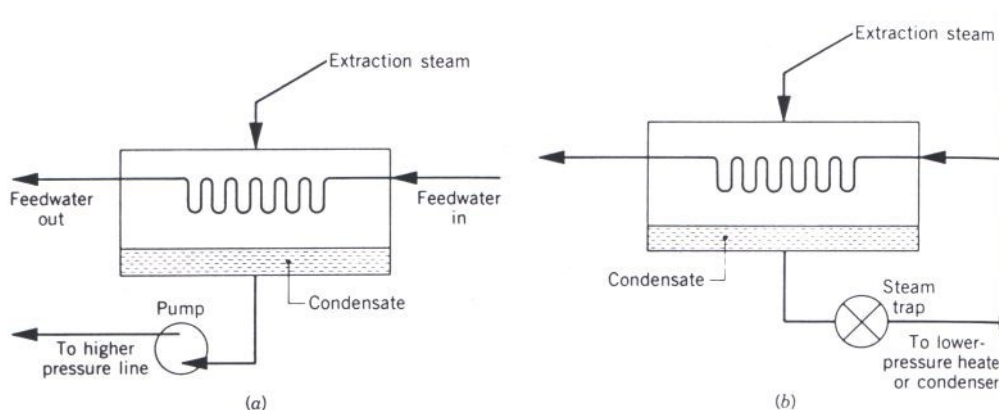
Energi yang dilepaskan ke air pendingin :

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_1} = (1 - y)(h_3 - h_4)$$

Pemanas Air Umpan Tertutup

Pemanasan air umpan dengan heater jenis tertutup dilakukan dengan menggunakan penukar kalor jenis *shell and tube* dimana suhu air umpan naik ketika uap yang diambil dari turbin mengalami kondensasi diluar *tube* yang membawa air umpan. Karena kedua aliran tidak bercampur maka tekanan masing-masing aliran bisa berbeda.

Gambar 10 memperlihatkan dua cara bagaimana memindahkan kondensat dari heater air umpan tertutup. Pada gambar 10.a. kondensat dipompa ke titik tekanan yang lebih tinggi pada siklus. Gambar 10.b. kondensat dibiarkan masuk ke *steam trap* (perangkap uap) yang ada di heater pada tekanan lebih rendah atau didalam kondenser.

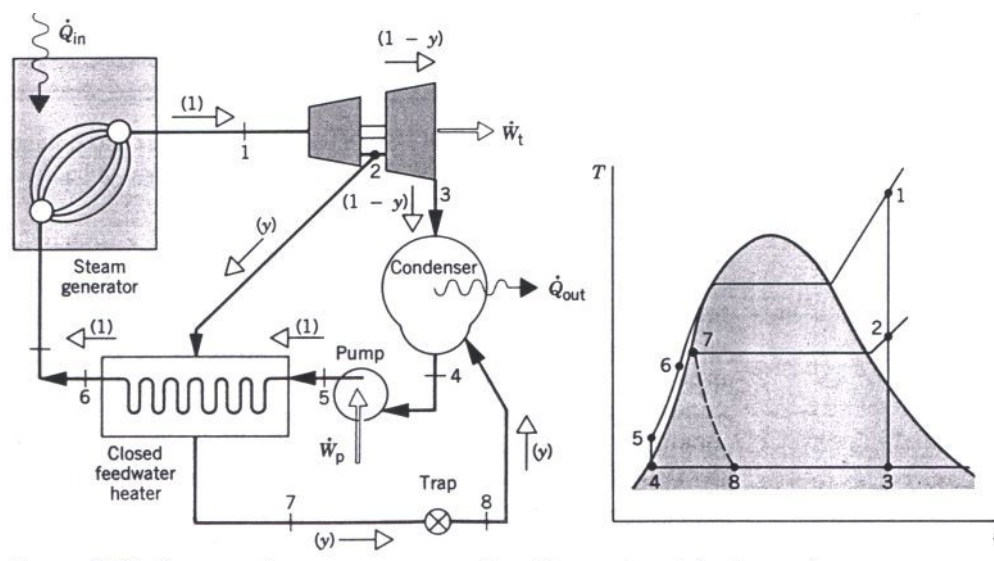


Gambar 10. Contoh pemanas air umpan tertutup.

Gambar 11. adalah siklus daya uap regeneratif yang mempunyai heater air umpan tertutup dengan perangkat kondensat didalam kondenser.

Keseimbangan energi :

$$0 = y(h_2 - h_7) + (h_5 - h_6)$$



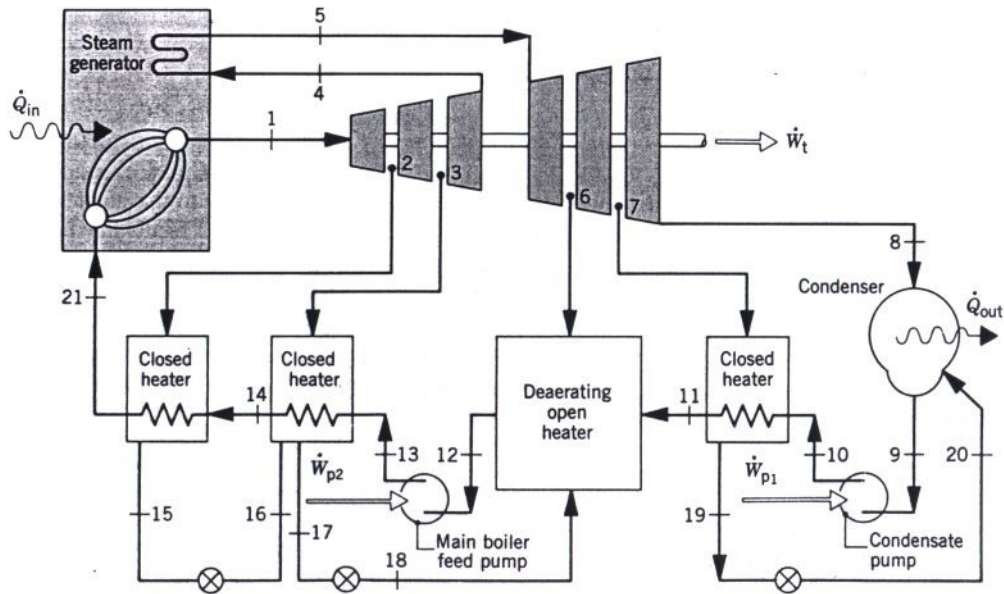
Gambar 11. Siklus daya uap regeneratif dengan satu buah pemanas air umpan tertutup.

maka y :

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$

Pemanas Air Umpan Jamak

Efisiensi termal bisa ditingkatkan dengan memakai beberapa pemanas air umpan pada tekanan yang memungkinkan.



Gambar 12. Contoh tata letak pembangkit daya.

Gambar diatas memperlihatkan pembangkit daya dengan tiga pemanas air umpan tertutup dan satu pemanas terbuka. Pembangkit daya dengan banyak pemanas air umpan biasanya mempunyai minimal satu buah pemanas air umpan terbuka yang beroperasi pada tekanan lebih besar dari tekanan atmosfer sehingga oksigen dan gas-gas lain yang terlarut bisa dibuang dari siklus.

Karakteristik Fluida Kerja, Siklus Uap Biner dan Kogenerasi

Air paling banyak digunakan sebagai fluida kerja karena beberapa keuntungan:

1. Mudah diperoleh
2. Biaya rendah.
3. Tidak beracun.
4. Stabil secara kimia.
5. Relatif tidak korosif.
6. Perubahan enthalpi spesifik relatif besar

Namun air juga mempunyai beberapa kekurangan diantaranya :

1. Suhu kritis air rendah ($374,14\text{ }^{\circ}\text{C}$).

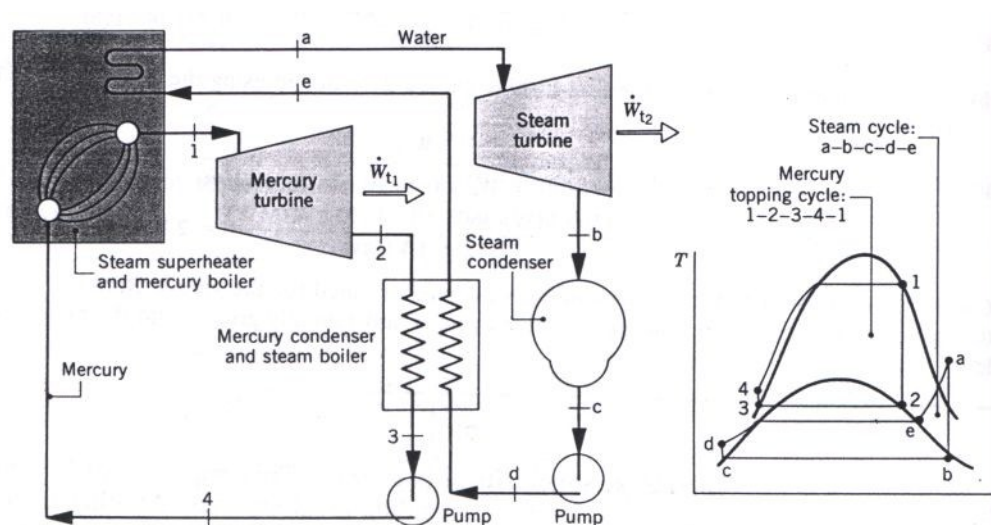
2. Tekanan jenuh pada suhu normal kondenser dibawah tekanan atmosfer, sehingga udara bisa masuk ke sistem.

Untuk siklus yang beroperasi pada temperatur yang relatif lebih rendah, fluida kerjanya akan lebih baik jika menggunakan refrigeran seperti amonia.

Sistem tenaga pada pesawat ruang angkasa menggunakan *mercury* sebagai fluida kerja karena mercury mempunyai karakteristik yaitu temperatur kerja yang lebih tinggi.

Air bisa digunakan bersama sama bahan lain pada siklus uap biner untuk mendapatkan unjuk kerja keseluruhan yang lebih baik.

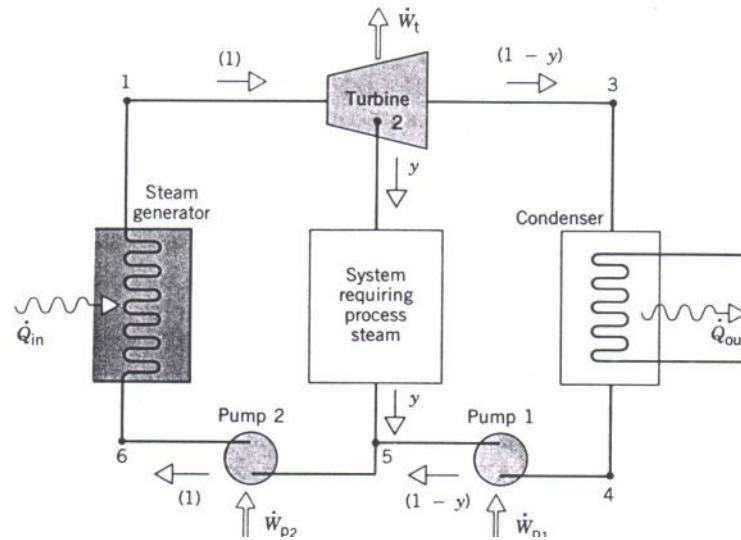
Siklus daya uap biner menggunakan dua fluida kerja, dimana satu mempunyai karakteristik yang baik pada suhu tinggi dan yang lainnya dengan karakteristik yang baik pada suhu yang lebih rendah. Contohnya siklus uap biner air-mercury.



Gambar 13. Siklus uap biner Air raksa (mercury) – air.

Siklus kogenerasi adalah proses pembangkitan daya dimana pemanasan uap dilakukan dari pembakaran bahan bakar, namun panas bahan bakar ini juga dimanfaatkan untuk keperluan lain misalnya untuk

pembangkitan listrik. Cara ini bisa menaikkan efisiensi dalam penggunaan sumber daya energi.



Gambar 14. Skema sistem kogenerasi dimana uap air dikeluarkan dari turbin.