

Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla, 5. Baskı
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Çeviri Editörü: Ali PINARBAŞI
McGraw-Hill, 2008

Bölüm 10

BUHARLI VE BİRLEŞİK GÜÇ ÇEVİRİMLERİ

Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

Amaçlar

- İş akışkanının çevrimde dönüşümlü olarak buharlaştırıldığı ve yoğuşturulduğu buharlı güç çevrimlerini çözümlmek.
- Kojenerasyon olarak adlandırılan, bileşik ısı-güç üretim sistemlerini çözümlmek.
- Ara ısıtmalı ve ara buhar almalı buharlı güç çevrimlerini çözümlmek.
- Birleşik çevrimler ve ikili çevrimler olarak bilinen ve iki farklı çevrimden oluşan güç çevrimlerini çözümlmek.
- Çevrimin ısı verimini artırmaya yönelik olarak temel Rankine buharlı güç çevriminde yapılabilecek düzenlemeleri incelemek.
- İkili çevrimlere ilişkin kavramları tanımak.



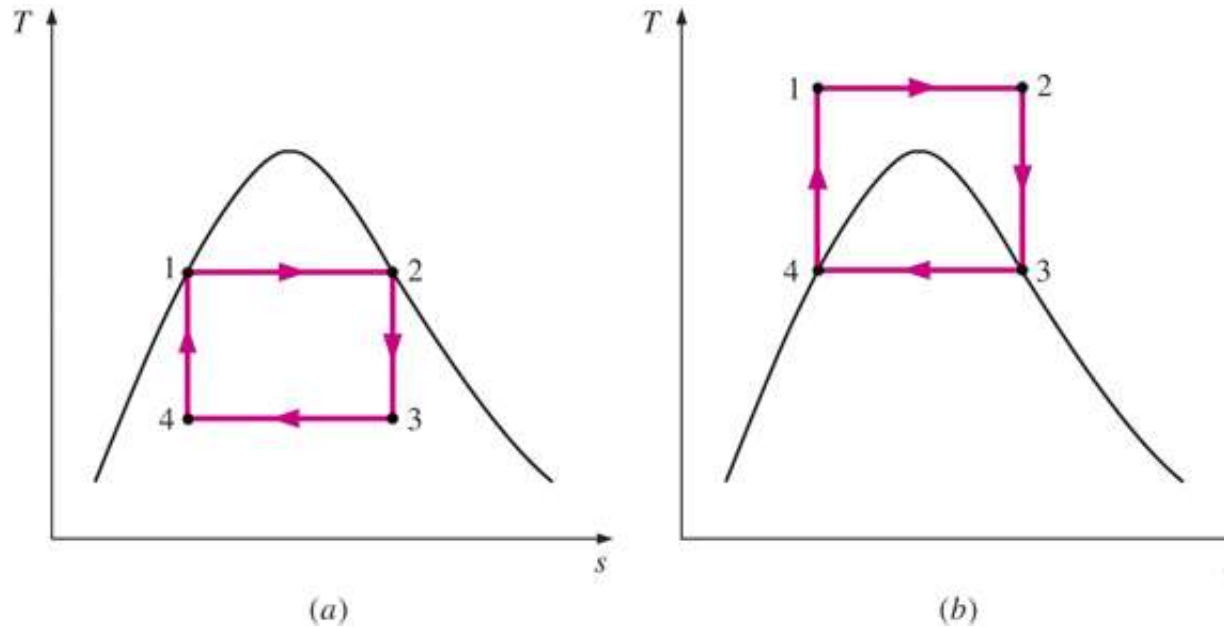
CARNOT BUHAR ÇEVİRİMİ

Belirli iki sıcaklık sınırı arasında çalışan en yüksek verimli çevrim Carnot çevrimidir buharlı güç santralleri için ideal bir çevrim değildir. Çünkü;

1-2 hal değişimi: Çevrimde kullanılabilecek en yüksek sıcaklığı önemli ölçüde kısıtlar (bu değer su için 374 C'dir). Çevrimin en yüksek sıcaklığının bu şekilde sınırlanması, ısı verimin de sınırlanması anlamına gelir.

2-3 hal değişimi. Genişleme işlemi sırasında buharın kuruluk derecesi azalır. Sıvı zerreciklerinin türbin kanatlarına çarpması, türbin kanatlarında aşınmaya ve yıpranmaya yol açar.

4-1 hal değişimi: İzantropik sıkıştırma işlemi sıvı-buhar karışımının doymuş sıvı haline sıkıştırılmasını gerektirmektedir. Bu işlemle ilgili iki zorluk vardır. Birincisi, yoğunlaşmanın 4 halinde istenen kuruluk derecesine sahip olarak son bulacak şekilde hassas olarak kontrol edilmesi kolay değildir. İkincisi, iki fazlı akışkanı sıkıştıracak şekilde bir kompresörün tasarlanması uygulamada zordur



İki Carnot buhar çevriminin T-s diyagramları

- 1-2 Kazanda izotermal ısı geçişi
- 2-3 Türbinde izantropik sıkıştırma
- 3-4 Kondenserde izotermal ısı çıkışı
- 4-1 Kompresörde izantropik sıkıştırma



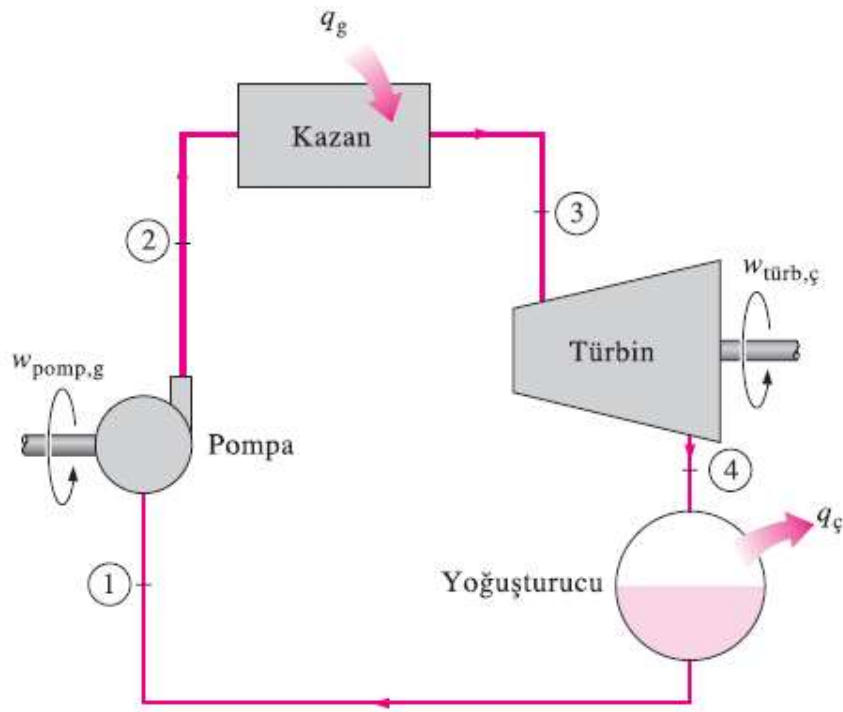
Carnot Çevrimi

RANKİNE ÇEVİRİMİ: BUHARLI GÜÇ ÇEVİRİMLERİ İÇİN İDEAL ÇEVİRİM

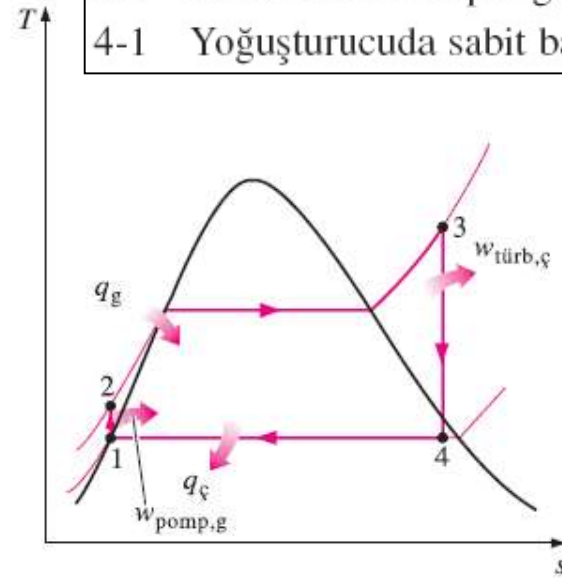
Carnot çevriminin uygulanmasında karşılaşılan sorunların bir çoğu, kazanda suyun kızgın buhar haline ısıtılması ve yoğuşturucuda doymuş sıvı haline soğutulmasıyla giderilebilir.

Oluşan bu çevrim, buharlı güç santrallerinin ideal çevrimi olan **Rankine çevrimidir**. İdeal Rankine çevrimi, içten tersinmezliklerin olmadığı dört hal değişiminden oluşur:

Basit ideal Rankine çevrimi



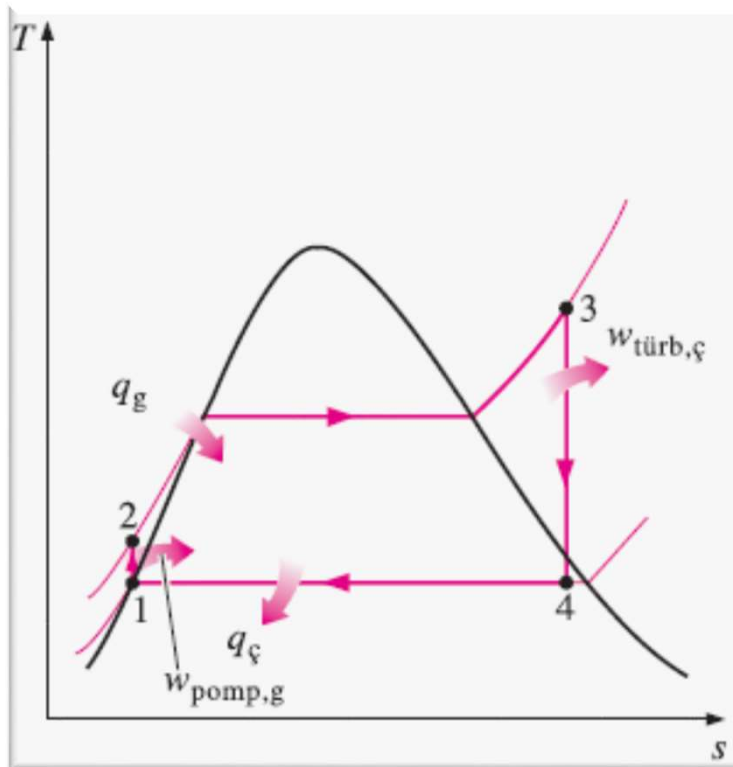
- 1-2 Pompada izantropik sıkıştırma
- 2-3 Kazanda sabit basınçta ısı girişi
- 3-4 Türbinde izantropik genişleme
- 4-1 Yoğuşturucuda sabit basınçta ısı atılması



İdeal Rankine Çevriminin Enerji Çözümlemesi

Sürekli akışlı enerji denklemi

$$(q_g - q_\phi) + (w_g - w_\phi) = h_{\text{çıkış}} - h_{\text{giriş}}$$



Pompa ($q = 0$):

$$w_{\text{pomp,g}} = h_2 - h_1$$

$$w_{\text{pomp,g}} = v(P_2 - P_1)$$

$$h_1 = h_f @ P_1 \quad \text{ve} \quad v \cong v_1 = v_f @ P_1$$

Kazan ($w = 0$):

$$q_g = h_3 - h_2$$

Türbin ($q = 0$):

$$w_{\text{turb,\phi}} = h_3 - h_4$$

Yoğuşturucu ($w = 0$):

$$q_\phi = h_4 - h_1$$

Rankine çevriminin ısı verimi

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_{\phi}}{q_g}$$

$$w_{net} = q_g - q_{\phi} = w_{turb,\phi} - w_{pomp,g}$$

Isıl verim aynı zamanda, çevrime ısı girişini gösteren eğrinin altında kalan alana oranı şeklinde yorumlanabilir.

ABD'deki güç santrallerinin dönüşüm verimleri genellikle, 1 kWh elektrik enerjisi üretmek için Btu cinsinden harcanan ısı olarak tanımlanan, **ısı oranı** ile ifade edilir.

$$\eta_{th} = \frac{3412 \text{ (Btu/kWh)}}{\text{Isı oranı (Btu/kWh)}}$$

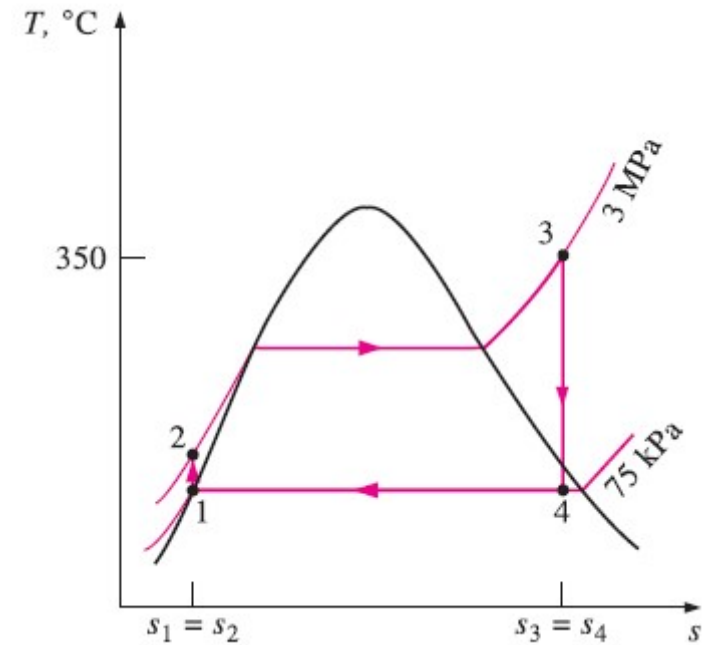
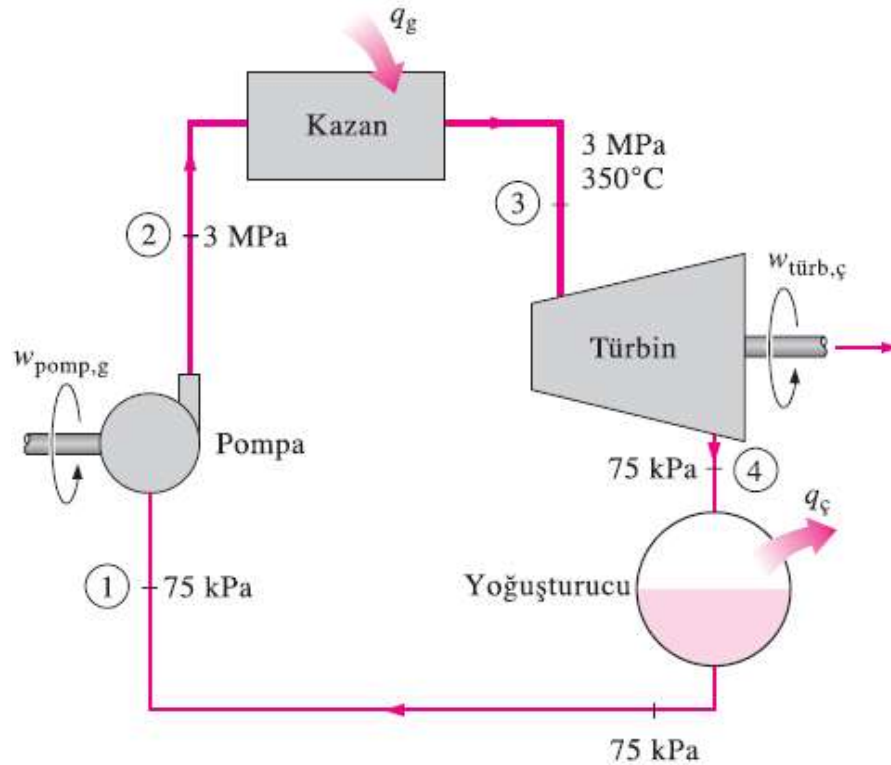


Rankine Çevrimi

Örnek 10-1

Basit ideal Rankine çevrimine göre çalışan, buharlı bir güç santrali düşünün. Buhar, türbine 3 MPa basınç ve 350 °C sıcaklıkta girmekte ve 75 kPa basınçta yoğunlaşmaktadır. Çevrimin ısı verimini hesaplayın

Güç santralinin ideal Rankine çevrimine göre çalıştığı belirtildiği için türbin ve pompanın izantropik oldukları kabul edilebilir. Ayrıca kazan ve yoğuşturucuda basıncın sabit kaldığı, buharın yoğuşturucudan, yoğuşturucu basıncında doymuş sıvı halinde çıktığı ve pompaya girdiği kabul edilmektedir.



$$1 \text{ Hali:} \quad \left. \begin{array}{l} P_1 = 75 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} h_1 = h_f @ 75 \text{ kPa} = 384.44 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_f @ 75 \text{ kPa} = 0.001037 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$2 \text{ Hali:} \quad \begin{array}{l} P_2 = 3 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}$$

$$w_{\text{pomp,g}} = v_1(P_2 - P_1) = (0.001037 \text{ m}^3/\text{kg})[(3000 - 75) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ = 3.03 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pomp,g}} = (384.44 + 3.03) \text{ kJ/kg} = 387.47 \text{ kJ/kg}$$

$$3 \text{ Hali:} \quad \left. \begin{array}{l} P_3 = 3 \text{ MPa} \\ T_3 = 350^\circ\text{C} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} h_3 = 3116.1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6.7450 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$4 \text{ Hali:} \quad P_4 = 75 \text{ kPa} \quad (\text{Doymuş sıvı-buhar karışımı})$$

$$s_4 = s_3$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7450 - 1.2132}{6.2426} = 0.8861$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 384.44 + 0.8861(2278.0) = 2403.0 \text{ kJ/kg}$$

$$q_g = h_3 - h_2 = (3116.1 - 387.47) \text{ kJ/kg} = 2728.6 \text{ kJ/kg}$$

$$q_\zeta = h_4 - h_1 = (2403.0 - 384.44) \text{ kJ/kg} = 2018.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{\zeta}}{q_g} = 1 - \frac{2018.6 \text{ kJ/kg}}{2728.6 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.260 \text{ veya } \%26}$$

Isıl verim aynı zamanda aşağıdaki gibi de hesaplanabilir:

$$w_{\text{türb},\zeta} = h_3 - h_4 = (3116.1 - 2403.0) \text{ kJ/kg} = 713.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_{\text{türb},\zeta} - w_{\text{pompa},g} = (713.1 - 3.03) \text{ kJ/kg} = 710.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = q_g - q_{\zeta} = (2728.6 - 2018.6) \text{ kJ/kg} = 710.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{\text{net}}}{q_g} = \frac{710.0 \text{ kJ/kg}}{2728.6 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.260 \text{ veya } \%26}$$

Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan Carnot çevriminin ısı veriminin hesaplanması gerekirse,

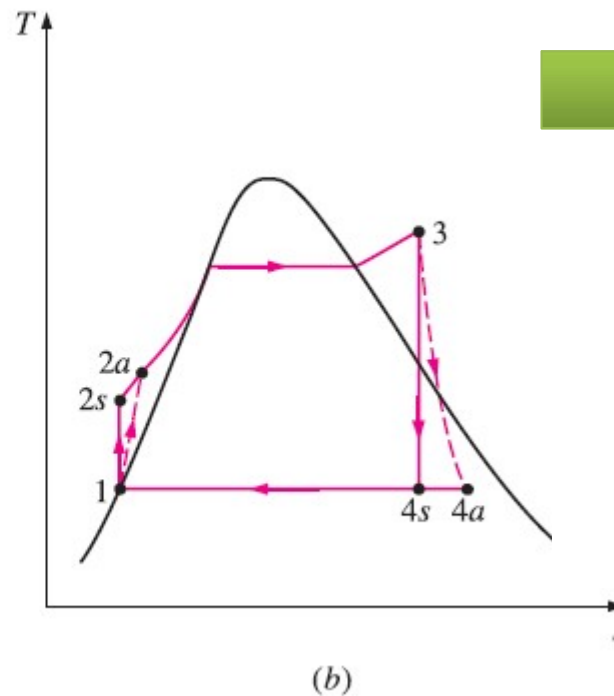
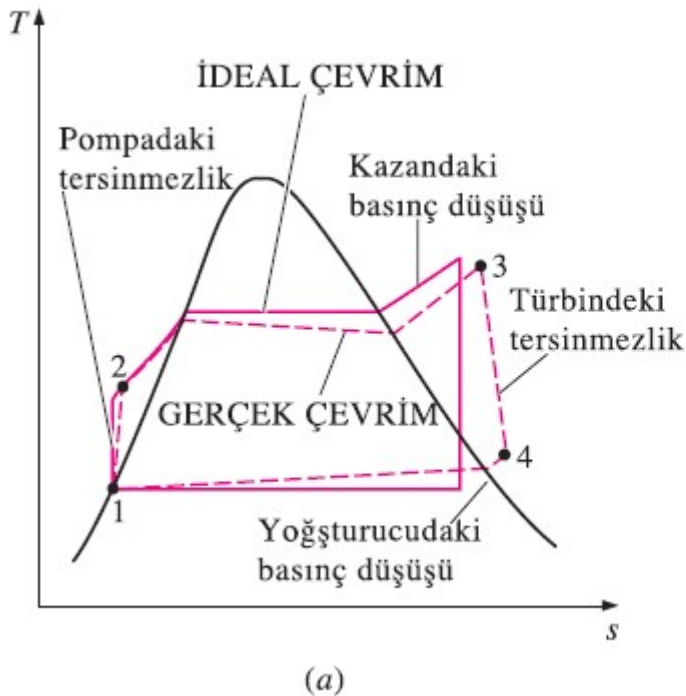
$$\eta_{th,\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{(91.76 + 273) \text{ K}}{(350 + 273) \text{ K}} = 0.415$$

Böylece güç santrali kazanda aldığı ısının yüzde 26'sını net işe dönüştürülebilmektedir. Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek bir güç santralinin ısı verimi sürtünme ve benzeri tersinmezliklerden dolayı daha az olacaktır, santralin geri iş oranı ($r_{gi} = w_{\text{pompa}} / w_{\text{türbin}}$) = 0.004'tür. Türbin işinin sadece % 0.4'ü pompayı çalıştırmak için kullanılmaktadır.

GERÇEK BUHARLI GÜÇ ÇEVİRİMİNİN İDEAL BUHARLI GÜÇ ÇEVİRİMİNDEN FARKI

Çeşitli tersinmezliklerden dolayı gerçek buharlı güç santrallerinin çevrimi, ideal Rankine çevriminden farklıdır.

Sürtünme ve **çevreye olan ısı kayıpları** tersinmezliklerin başlıca iki kaynağıdır.



İzantropik verimler

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_g} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2g} - h_1}$$

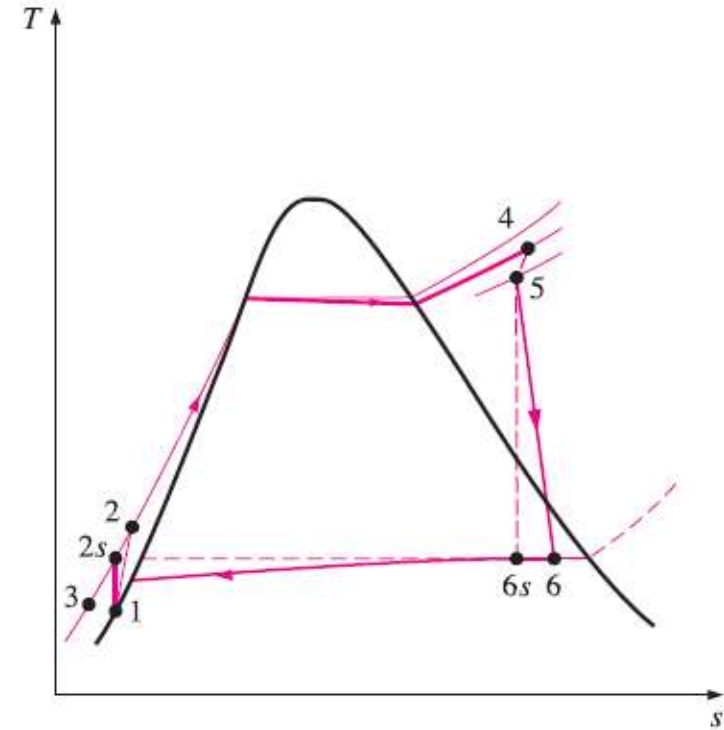
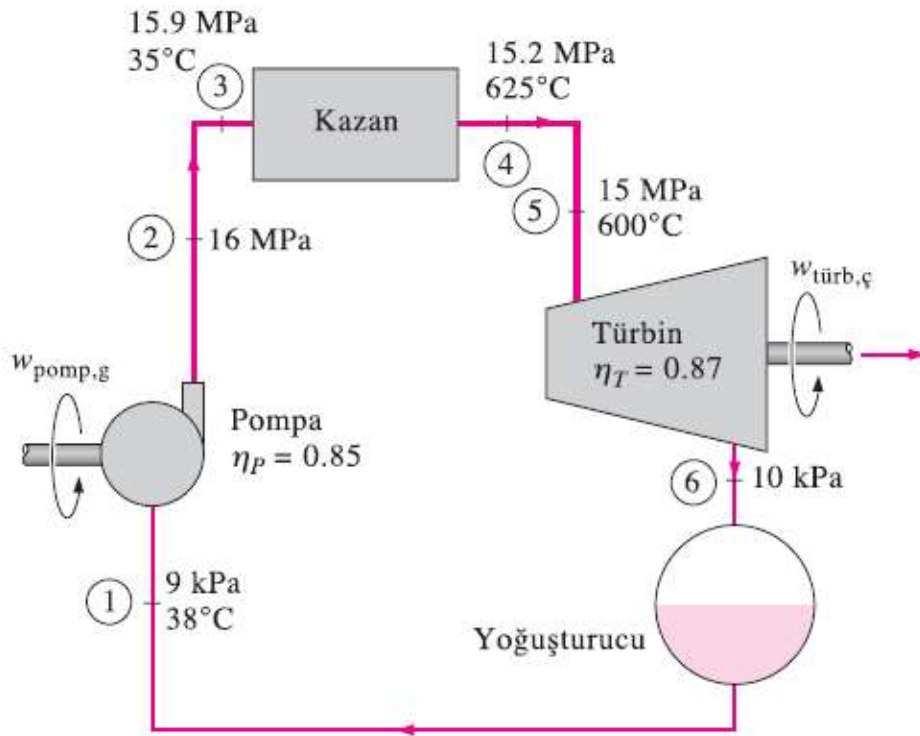
$$\eta_T = \frac{w_g}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4g}}{h_3 - h_{4s}}$$

- (a) Gerçek buharlı güç çevriminin ideal Rankine çevriminden farklılığı.
(b) Pompa ve türbindeki tersinmezliklerin ideal Rankine çevrimi üzerindeki etkileri.

Örnek 10-2

Bir buharlı güç santrali şeklindeki çevrime göre çalışmaktadır. Türbinin ve pompanın adyabatik verimleri sırasıyla yüzde 87 ve 85'tir. (a) Çevrimin ısıl verimini, (b) buharın kütle debisi 15 kg/s olduğuna göre santralin gücünü hesaplayın.

Kabuller Çevrimin tüm elemanları sürekli akışlı açık sistem olarak ele alınmakta, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmektedir. Verilen hallerde gerekli diğer özellikler, buhar tablolarından elde edilebilir.



(a) Çevrimin ısı verimi,

Pompaya verilen iş:

$$\begin{aligned} w_{\text{pomp,g}} &= \frac{w_{s,\text{pomp,g}}}{\eta_p} = \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_p} \\ &= \frac{(0.001009 \text{ m}^3/\text{kg})[(16,000 - 9) \text{ kPa}]}{0.85} \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 19.0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Türbinden elde edilen iş:

$$\begin{aligned} w_{\text{türb,ç}} &= \eta_T w_{s,\text{türb,ç}} \\ &= \eta_T(h_5 - h_{6s}) = 0.87(3583.1 - 2115.3) \text{ kJ/kg} = 1277.0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kazanda çevrime giren ısı:

$$q_g = h_4 - h_3 = (3647.6 - 160.1) \text{ kJ/kg} = 3487.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_{\text{türb,ç}} - w_{\text{pomp,g}} = (1277.0 - 19.0) \text{ kJ/kg} = 1258.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_g} = \frac{1258 \text{ kJ/kg}}{3487.5 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.361 \text{ veya } \%36.1}$$

(b) Bu güç santrali tarafından üretilen güç:

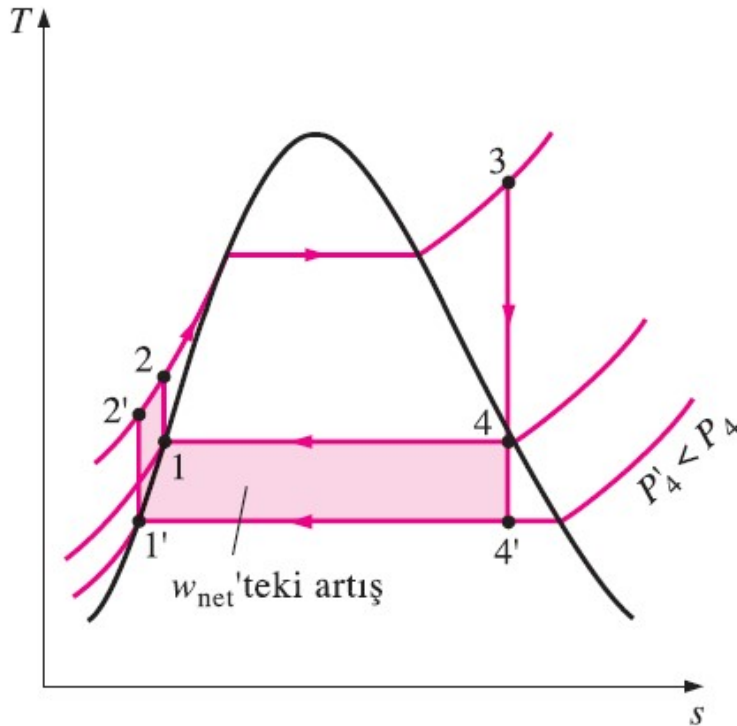
$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m}(w_{\text{net}}) = (15 \text{ kg/s})(1258.0 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{18.9 \text{ MW}}$$

RANKİNE ÇEVİRİMİNİN VERİMİ NASIL ARTIRILABİLİR?

Bir güç çevriminin ısı verimini artırmaya yönelik bütün değişikliklerin arkasında yatan temel düşünce aynıdır:

"Kazanda iş akışkanına ısı geçişinin sağlandığı ortalama sıcaklığın yükseltilmesi veya yoğusturucuda iş akışkanından ısı atıldığı ortalama sıcaklığın düşürülmesi" şeklinde özetlenebilir.

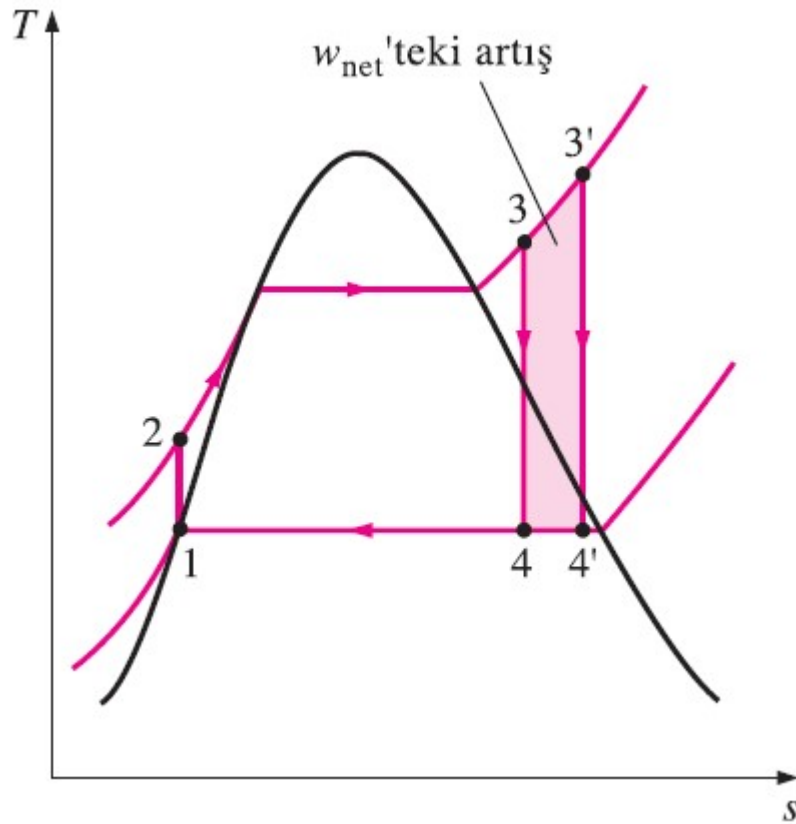
Yoğusturucu Basıncının Düşürülmesi (TL,ort 'yı düşürür)



Düşük basınç sonucu ısı verimindeki artıştan yararlanmaya yönelik olarak buharlı güç santrallerindeki yoğusturucular genellikle atmosfer basıncının oldukça altında çalıştırılırlar. Fakat yoğusturucu basıncının düşürülebileceği bir alt sınır vardır.

Yan etkisi: Türbinin son kademelerinde kuruluk derecesinin azalmasıdır. Buharın içinde sıvı zerreciklerinin bulunması hem türbin veriminin azalmasına, hem de türbin kanatlarının aşınmasına yol açar.

Buharın Kızdırılması (TH,ort 'yı yükseltir)



Buhara ısının verildiği ortalama sıcaklık, kazan basıncı yükseltilmeden buharın kızgın buhar bölgesinde daha yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla artırılabilir. Kızdırmanın buharlı güç çevriminin performansına etkisi Şekil'de bir T-s diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Bu diyagramdaki renklendirilmiş alan net işteki artışı göstermektedir.

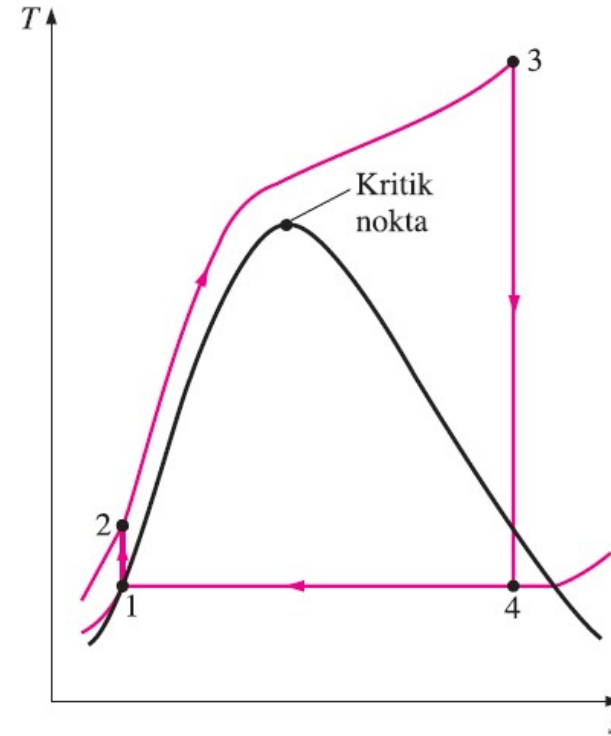
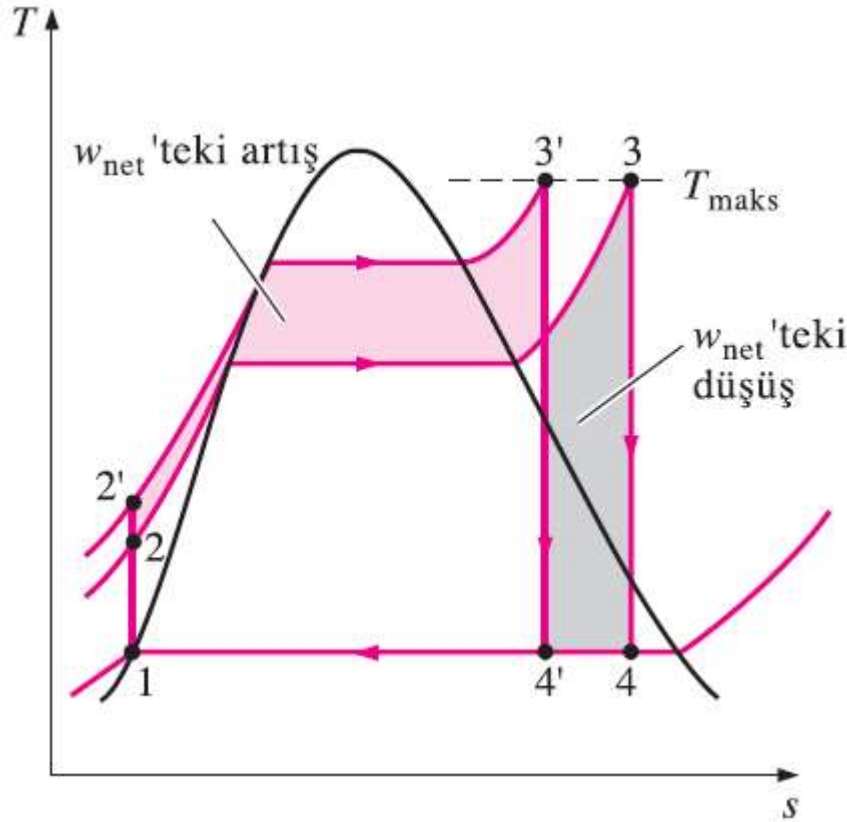
Kızdırma sonucu türbin çıkışındaki buharın kuruluk derecesi artmaktadır

Yan etkisi: Buharın kızdırılabileceği sıcaklık, malzeme dayanımıyla sınırlıdır. Günümüzde türbin girişinde izin verilebilen en yüksek buhar sıcaklığı yaklaşık 620°C dolaylarındadır.

Kazan Basıncının Yükseltilmesi ($T_{H \text{ ort}}$ 'yı yükseltir)

Türbin giriş sıcaklığının sabit tutulması durumunda çevrimin sola doğru kaydığına ve türbin çıkışında buharın kuruluk derecesinin azaldığına dikkat edilmelidir.

Günümüzde buharlı güç santralleri kritik basıncın üzerindeki basınçlarda ($P > 22.09$ MPa); fosil yakıtlı santrallerde yaklaşık % 40, nükleer santrallerde ise % 34 ısı verimle çalışmaktadır.



Kritik basınç üzerinde çalışan Rankine çevrimi.



Rankine Çevrimi ($T_{H,ort}$ artırılması)

Örnek 10-3

ideal Rankine çevrimine göre çalışan buharlı bir güç çevriminde, su buharı türbine 3 MPa basınç ve 350°C sıcaklıkta girmekte ve 10 kPa yoğusturucu basıncına genişlemektedir, a- Santralin ısıl verimini hesaplayın, b- Bu buharının kazanda 350°C yerine 600°C sıcaklığa ısıtılması durumunda ısıl verimin ne olacağını hesaplayın, c- Kazan basıncının 15 MPa'e yükseltilip, türbin giriş sıcaklığının 600°C'de kalması durumunda ısıl verimin ne olacağını hesaplayın.

a- Santralin ısıl verimi;

$$1 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_f @ 10 \text{ kPa} = 191.81 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_f @ 10 \text{ kPa} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$2 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_2 = 3 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}$$

$$w_{\text{pomp,g}} = v_1(P_2 - P_1) = (0.00101 \text{ m}^3/\text{kg})[(3000 - 10) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ = 3.02 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pomp,g}} = (191.81 + 3.02) \text{ kJ/kg} = 194.83 \text{ kJ/kg}$$

$$3 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_3 = 3 \text{ MPa} \\ T_3 = 350^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3116.1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6.7450 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$4 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_4 = 10 \text{ kPa} \\ s_4 = s_3 \end{array}$$

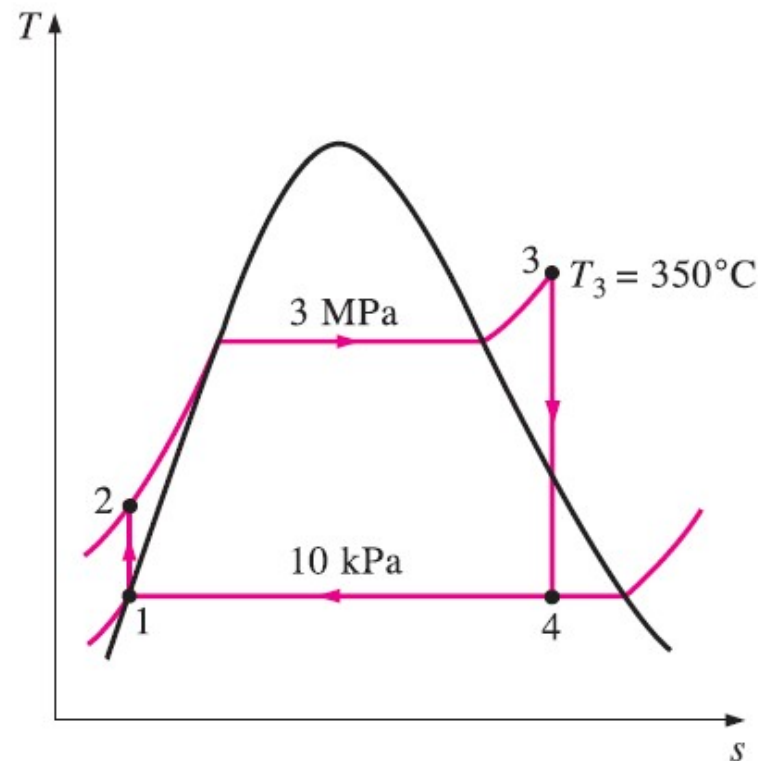
$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7450 - 0.6492}{7.4996} = 0.8128$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 191.81 + 0.8128(2392.1) = 2136.1 \text{ kJ/kg}$$

$$q_g = h_3 - h_2 = (3116.1 - 194.83) \text{ kJ/kg} = 2921.3 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = h_4 - h_1 = (2136.1 - 191.81) \text{ kJ/kg} = 1944.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_c}{q_g} = 1 - \frac{1944.3 \text{ kJ/kg}}{2921.3 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.334 \text{ veya } \% 33.4}$$



(b) 1 ve 2 halleri aynı kalmaktadır. 3 halinde (3 MPa ve 600 °C) ve 4 halinde (10 kPa ve $s_4 = s_3$) entalpiler benzer bir biçimde bulunabilir:

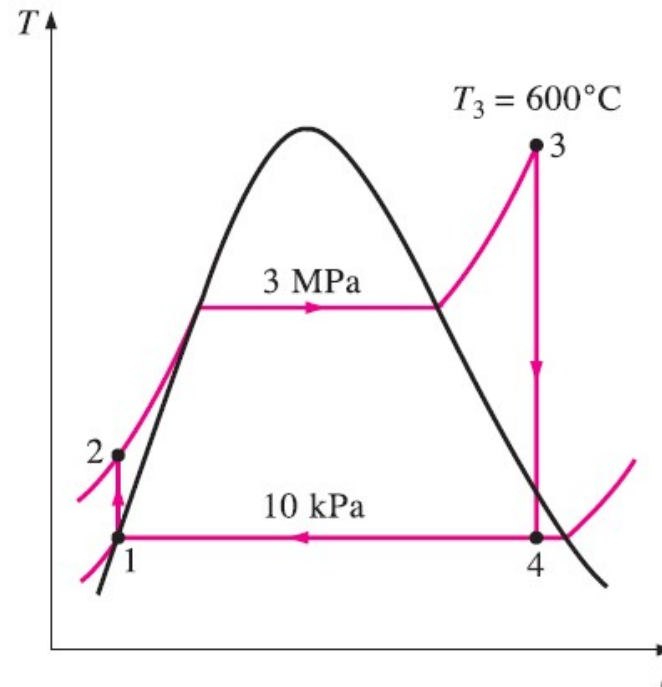
$$h_3 = 3682.8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 2380.3 \text{ kJ/kg} \quad (x_4 = 0.915)$$

$$q_g = h_3 - h_2 = 3682.8 - 194.83 = 3488.0 \text{ kJ/kg}$$

$$q_\phi = h_4 - h_1 = 2380.3 - 191.81 = 2188.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_\phi}{q_g} = 1 - \frac{2188.5 \text{ kJ/kg}}{3488.0 \text{ kJ/kg}} = 0.373 \text{ veya } \% 37.3$$



(c) 1 hali aynı kalmakta, diğer haller değişmektedir. 2 halinde (15 MPa ve $s_2=s_1$), 3 halinde (15 MPa ve 600 °C), 4 halinde (10 kPa ve $s_4=s_3$) entalpiler yukarıdakine benzer bir biçimde hesaplanabilir:

$$h_2 = 206.95 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 3583.1 \text{ kJ/kg}$$

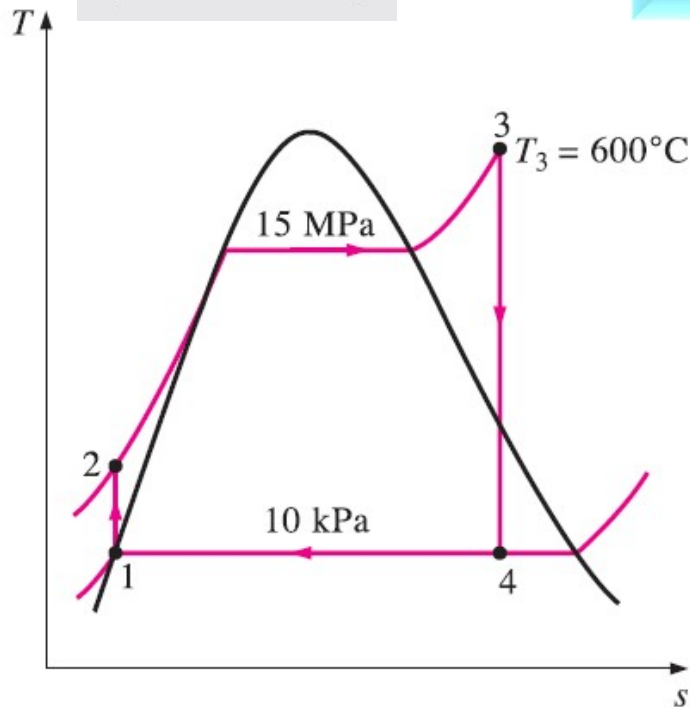
$$h_4 = 2115.3 \text{ kJ/kg}$$

$$(x_4 = 0.804)$$

$$q_g = h_3 - h_2 = 3583.1 - 206.95 = 3376.2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{ç}} = h_4 - h_1 = 2115.3 - 191.81 = 1923.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_{\text{ç}}}{q_g} = 1 - \frac{1923.5 \text{ kJ/kg}}{3376.2 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.430 \text{ veya } \% 43.0}$$



Türbin giriş sıcaklığı 600 °C'ta kalırken, kazan basıncını 3 MPa'den 15 MPa'e yükseltmek ısı verimi % 37.3'ten 43.0'e yükseltmektedir. Aynı zamanda, türbin çıkışında buharın kuruluk derecesi de 0.914'ten 0.804'e azalmaktadır. Başka bir deyişle, doymuş sıvı buhar karışımındaki sıvının miktarı artmaktadır.

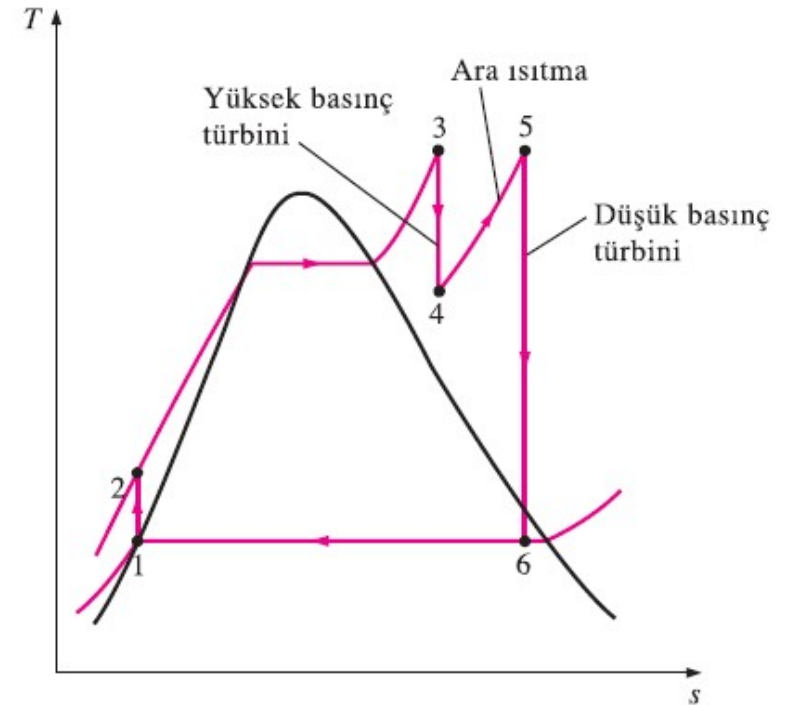
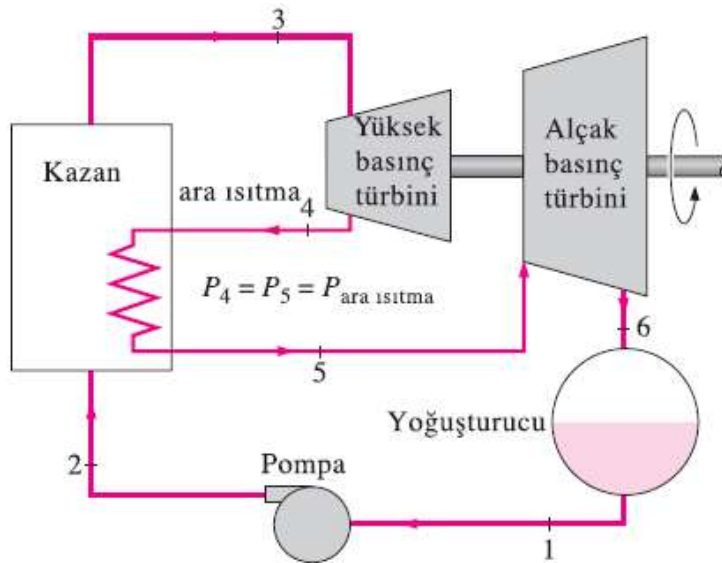
İDEAL ARA ISITMALI RANKİNE ÇEVİRİMİ

Türbinin son kademesindeki kuruluk derecesini azaltmadan, yüksek kazan basıncı nedeniyle sağlanan verim artışından nasıl yararlanabiliriz?

1. Türbine girmeden önce buhar çok yüksek sıcaklıklara kızdırılabilir. Türbin malzemesi tarafından sınırlıdır .
2. Buhar türbinde iki kademede genişletilebilir ve kademeler arasında ara ısıtma uygulanabilir.

$$q_g = q_{\text{birinci}} + q_{\text{ara ısıtma}} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$w_{\text{türb,ç}} = w_{\text{türb,I}} + w_{\text{türb,II}} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

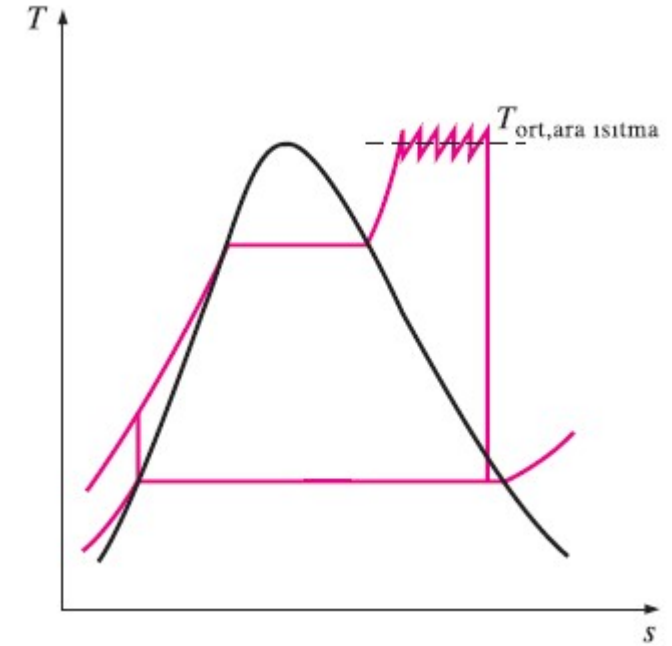


Günümüz güç santrallerinde bir kademe ara ısıtmanın uygulanması, buhara ısı verilen ortalama sıcaklığı yükselttiği için çevrimin ısı verimini yüzde 4 ila 5 düzeyinde artırmaktadır.

Genişleme ve ara ısıtma kademe sayısı artırılarak, ara ısıtma sırasındaki ortalama sıcaklık yükseltilebilir. Kademe sayısı arttıkça, genişleme ve ara ısıtma işlemleri en yüksek sıcaklıkta izotermal ısı geçişine yaklaşmaktadır. Fakat iki kademedenden daha fazla ara ısıtmanın yapılması ekonomik değildir. İkinci ara ısıtma kademesiyle sağlanan kuramsal verim artışı, tek ara ısıtma kademesiyle sağlananın yaklaşık yarısı kadar olmaktadır

Ara ısıtma sıcaklıkları, türbin giriş sıcaklıklarına eşit veya çok yakındır

En uygun ara ısıtma basıncı, en yüksek çevrim basıncının yaklaşık dörtte biri kadardır.



Ara ısıtma kademe sayısı artırıldıkça, çevrime ısı verilen ortalama sıcaklık yükselir.



Rankine Çevrimi (*İdeal Arasııtmalı Rankine Çevrimi*)

(a) Ara ısıtma basıncı, 5 ve 6 hallerinde entropilerin eşit olmasından yola çıkarak bulunabilir:

$$6 \text{ Hali: } P_6 = 10 \text{ kPa}$$

$$x_6 = 0.896 \quad (\text{doymuş sıvı-buhar karışımı})$$

$$s_6 = s_f + x_6 s_{fg} = 0.6492 + 0.896(7.4996) = 7.3688 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_6 = h_f + x_6 h_{fg} = 191.81 + 0.896(2392.1) = 2335.1 \text{ kJ/kg}$$

$$5 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} T_5 = 600^\circ\text{C} \\ s_5 = s_6 \end{array} \right\} \begin{array}{l} P_5 = \mathbf{4.0 \text{ MPa}} \\ h_5 = 3674.9 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

Türbin çıkışında kuruluk derecesinin 0.896 veya daha büyük olabilmesi için, buharın ara ısıtmasının 4.0 Mpa veya daha düşük bir basınçta yapılması gerekmektedir.

(b) Isıl verimin hesaplanabilmesi için diğer hallerde entalpilerin bulunması gerekmektedir:

$$1 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_f @ 10 \text{ kPa} = 191.81 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_f @ 10 \text{ kPa} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$\begin{aligned} 2 \text{ Hali: } \quad P_2 &= 15 \text{ MPa} \\ s_2 &= s_1 \end{aligned} \quad \begin{aligned} w_{\text{pomp,g}} &= v_1(P_2 - P_1) = (0.00101 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &\quad \times [(15,000 - 10) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 15.14 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pomp,g}} = (191.81 + 15.14) \text{ kJ/kg} = 206.95 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ Hali:} \\ P_3 = 15 \text{ MPa} \\ T_3 = 600^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3583.1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6.6796 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} 4 \text{ Hali:} \\ P_4 = 4 \text{ MPa} \\ s_4 = s_3 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_4 = 3155.0 \text{ kJ/kg} \\ (T_4 = 375.5^\circ\text{C}) \end{array}$$

$$\begin{aligned} q_g &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \\ &= (3583.1 - 206.95) \text{ kJ/kg} + (3674.9 - 3155.0) \text{ kJ/kg} \\ &= 3896.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

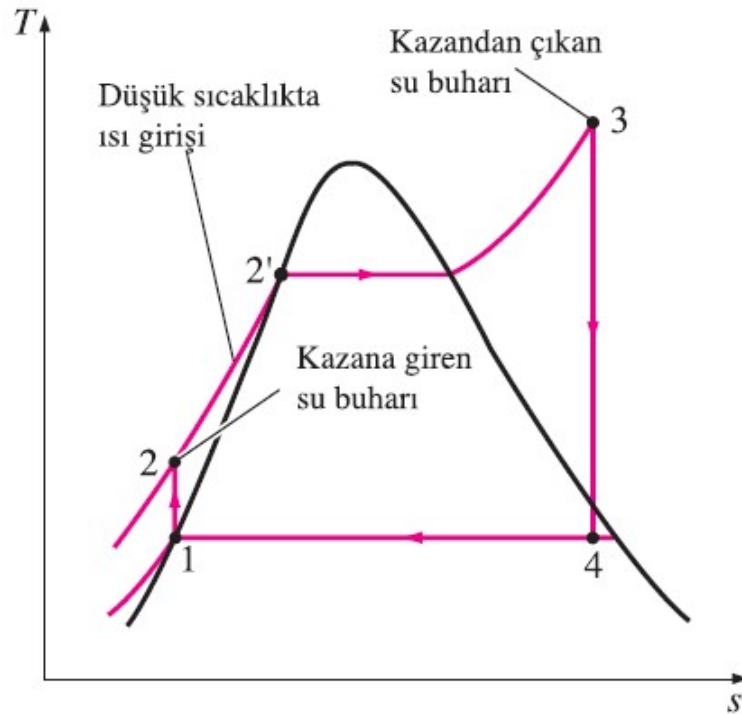
$$\begin{aligned} q_\zeta &= h_6 - h_1 = (2335.1 - 191.81) \text{ kJ/kg} \\ &= 2143.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_\zeta}{q_g} = 1 - \frac{2143.3 \text{ kJ/kg}}{3896.1 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.450 \text{ veya } \%45}$$

Önceki problemdeki sonuçlar karşılaştırıldığı zaman ara ısıtmanın türbin çıkışındaki kuruluk derecesini yüzde 80.4'ten 89.6'ya, çevrimin ısı verimini ise % 43.0'ten % 45.0'e yükselttiğini göstermektedir.

İDEAL ARA BUHAR ALMALI RANKİNE ÇEVİRİMİ

Hal değişimi sırasında iş akışkanına ısı geçişinin sağlandığı sıcaklığın göreceli olarak düşük olduğu gözlenebilir. Bu durum, çevrime ısı girişinin sağlandığı ortalama sıcaklığın düşmesine ve böylece çevrim veriminin azalmasına neden olmaktadır.

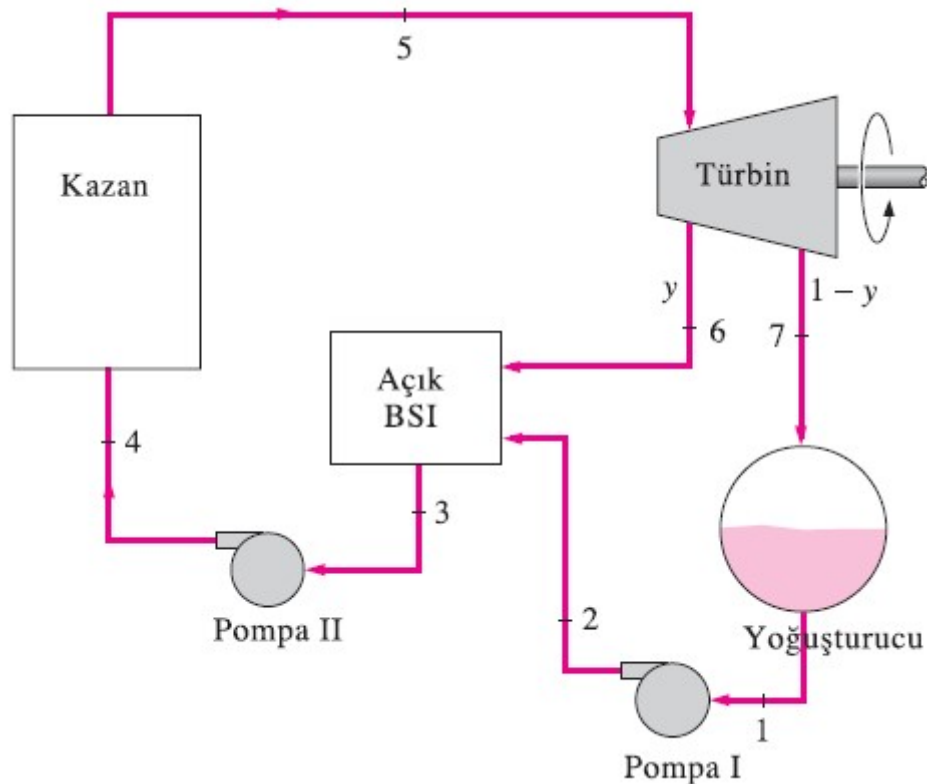


Kazandaki ısı geçişinin ilk bölümü göreceli olarak düşük sıcaklıklarda gerçekleşir.

Kazan besleme suyunun ısıtılmasının daha uygulanabilir bir yolu, türbinde genişleyen buharın bir bölümünün belirli noktalarda türbinden dışarı alınarak kazan besleme suyunun ısıtılmasında kullanılmasıdır. Böylece, türbinde genişlemeye devam etmesi durumunda daha çok iş üretebilecek olan buhar, kazan besleme suyunun ısıtılmasında kullanılmış olur. Bu işleme **ara buhar alma veya rejenerasyon**; rejenerasyon yoluyla kazan besleme suyunun ısıtılmasında kullanılan ısı değiştiricisine de **besleme suyu ısıtıcısı veya rejeneratör** adı verilir. Besleme suyu ısıtıcısı esas olarak, iki akışın doğrudan karışarak (**açık besleme suyu ısıtıcısı**) veya birbirine karışmadan (**kapalı besleme suyu ısıtıcısı**) ısı alışverişinde bulundukları bir ısı değiştiricisidir.

Açık Besleme Suyu Isıtıcıları

Açık (veya doğrudan temaslı) besleme suyu ısıtıcısı, temelde türbinden çıkan buharla pompadan çıkan besleme suyunun karıştığı bir *karışım odasıdır*. İdeal durumda karışım ısıtıcıdan, ısıtıcı basıncında doymuş sıvı olarak çıkar.



$$q_g = h_5 - h_4$$

$$q_{\xi} = (1 - y)(h_7 - h_1)$$

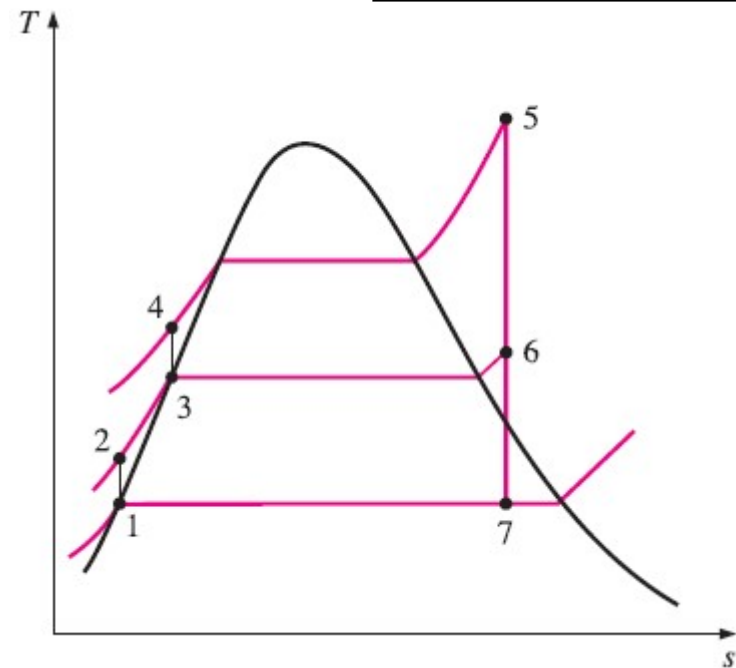
$$w_{\text{türb},\zeta} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7)$$

$$w_{\text{pomp,g}} = (1 - y) w_{\text{pomp I,g}} + w_{\text{pomp II,g}}$$

$$y = \dot{m}_6/\dot{m}_5$$

$$w_{\text{pompa I,g}} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{\text{pompa II,g}} = v_3(P_4 - P_3)$$

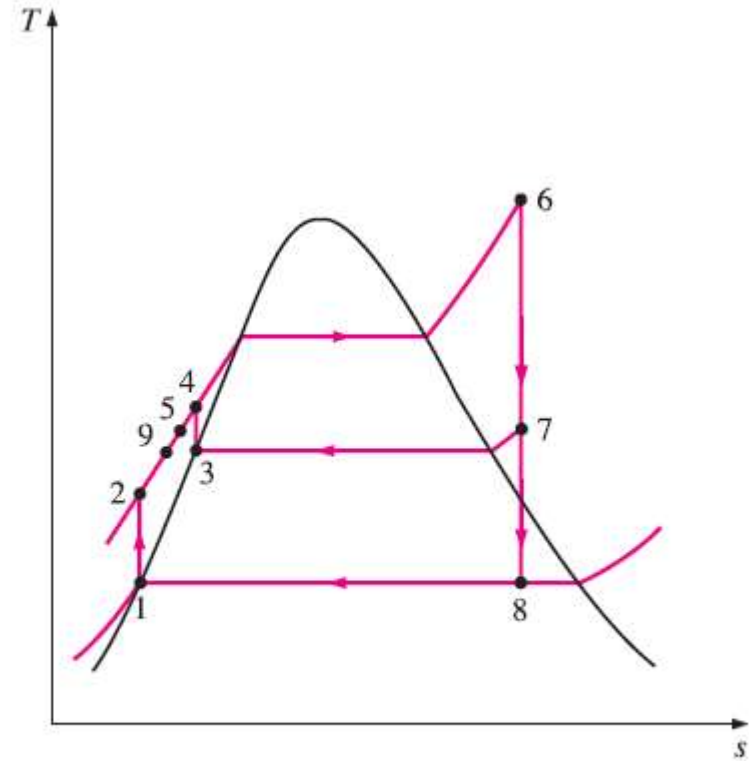
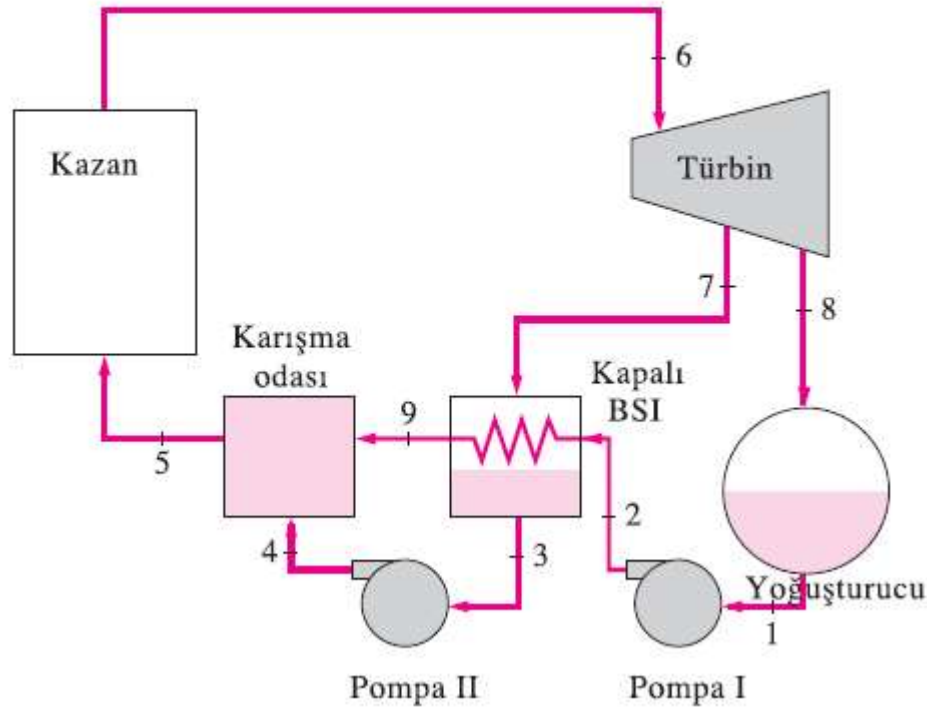




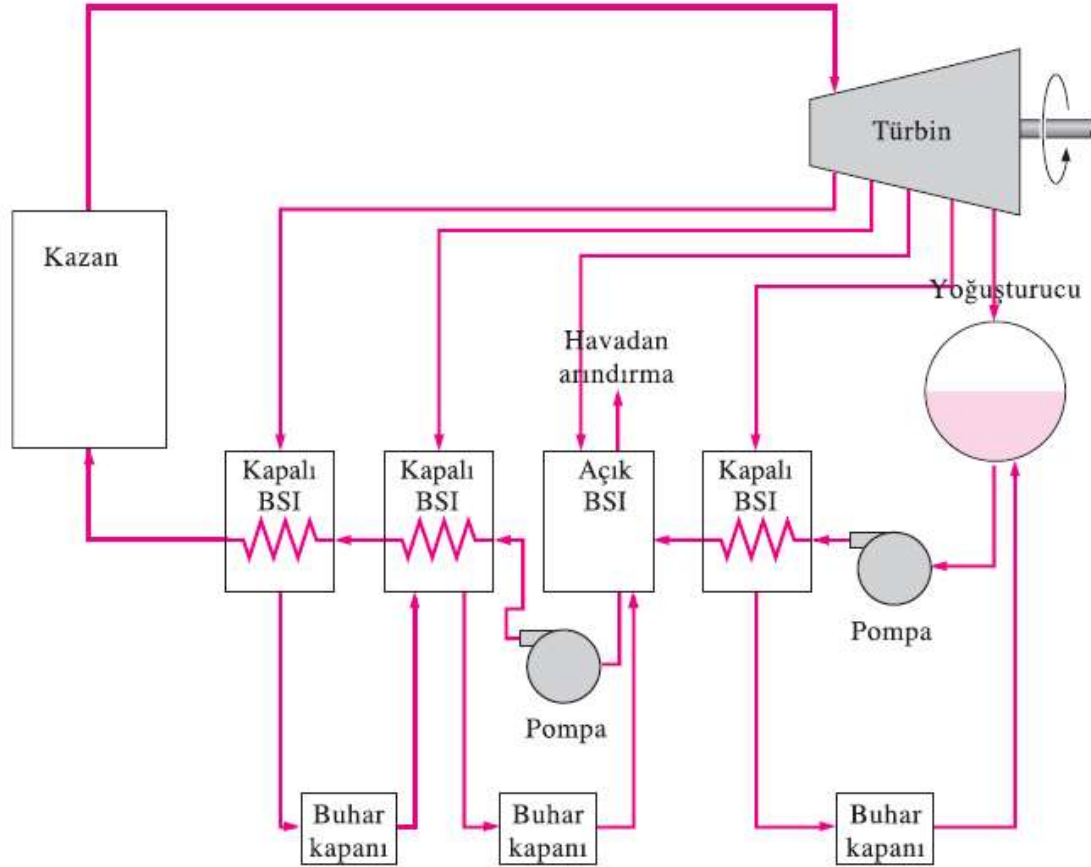
Rankine Çevrimi (Açık Besleme suyu Isıtıcılı)

Kapalı Besleme Suyu Isıtıcıları

Buharlı güç santrallerinde yaygın olarak kullanılan bir başka tür besleme suyu ısıtıcısı, **kapalı besleme suyu ısıtıcısı**dır. Burada türbinden ayrılan buhardan kazan besleme suyuna olan ısı geçişi, akışlar birbirine karışmadan gerçekleşir. Karışma olmadığından, iki akış farklı basınçlarda olabilir.



Bir açık ve üç kapalı besleme suyu ısıtıcılı buharlı güç santrali



Kapalı besleme suyu ısıtıcıları, içlerindeki boru düzeneği nedeniyle daha karmaşık ve daha pahalıdır.

Akışlar doğrudan temas etmediklerinden, kapalı besleme suyu ısıtıcılarındaki ısı geçişi daha az etkindir.

Buna karşın, türbinden ayrılan buhar ve besleme suyu farklı basınçlarda olabildiğinden, her bir ısıtıcı için ayrı bir pompa gerekmez.

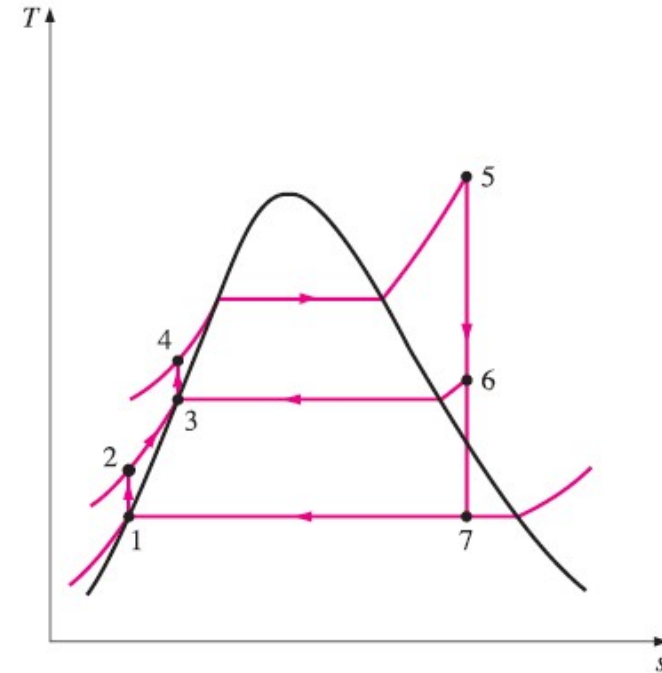
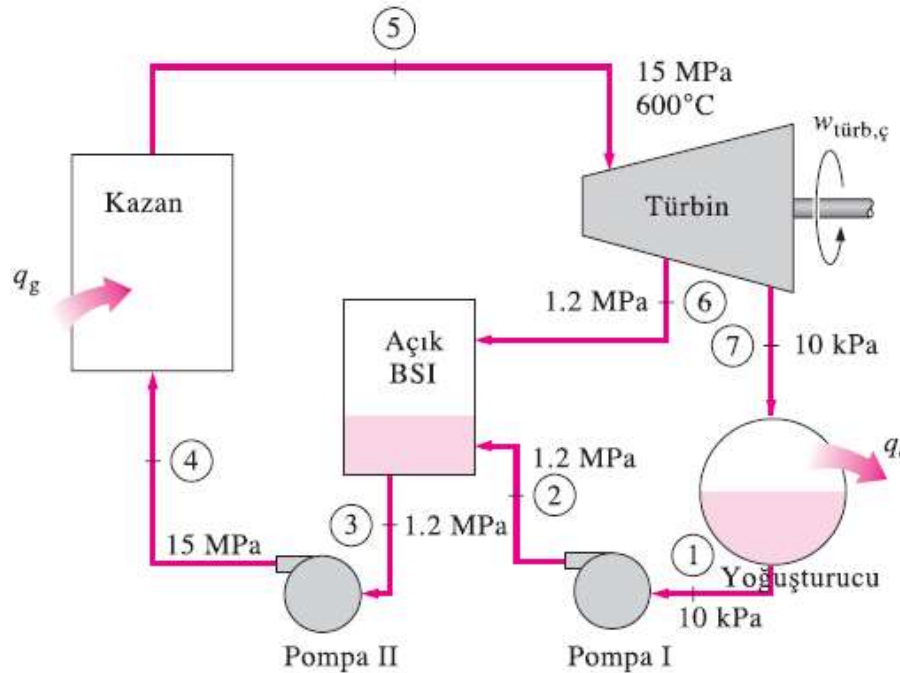
Açık besleme suyu ısıtıcıları basit ve ucuz olup, iyi ısı geçiş özelliklerine sahiptir. Fakat, her ısıtıcı için ayrı bir besleme suyu pompası gerekir.

Buharlı güç santrallerinin çoğunda, açık ve kapalı besleme suyu ısıtıcıları birlikte kullanılmaktadır.

Örnek 10-5

ideal ara buhar almalı Rankine çevrimine göre çalışan bir buharlı güç santralinde bir adet açık besleme suyu ısıtıcısı kullanılmaktadır. Buhar türbine 15 MPa basınç ve 600 °C sıcaklıkta girmektedir. Yoğuşturucu basıncı 10 kPa'dır. Bir miktar buhar türbinden 1.2 MPa basınçta ayrılarak, açık besleme suyu ısıtıcısına gönderilmektedir. Türbinden ayrılan buhar miktarını ve çevrimin ısı verimini hesaplayın.

Güç santralinin ideal ara buhar almalı Rankine çevrimine göre çalıştığı belirtildiği için, türbin ve pompaların izantropik olduğu kabul edilebilir. Ayrıca, kazanda, besleme suyu ısıtıcısında ve yoğuşturucuda basıncın düşmediği, buharın yoğuşturucu ve besleme suyu ısıtıcısından doymuş sıvı halinde çıktığı kabul edilebilir.



$$1 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_f @ 10 \text{ kPa} = 191.81 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_f @ 10 \text{ kPa} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$2 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_2 = 1.2 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}$$

$$w_{\text{pompa I,g}} = v_1(P_2 - P_1) = (0.00101 \text{ m}^3/\text{kg})[(1200 - 10) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ = 1.20 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pompa I,g}} = (191.81 + 1.20) \text{ kJ/kg} = 193.01 \text{ kJ/kg}$$

$$3 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_3 = 1.2 \text{ MPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \begin{array}{l} v_3 = v_f @ 1.2 \text{ MPa} = 0.001138 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_3 = h_f @ 1.2 \text{ MPa} = 798.33 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

$$4 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_4 = 15 \text{ MPa} \\ s_4 = s_3 \end{array}$$

$$w_{\text{pompa II,g}} = v_3(P_4 - P_3) \\ = (0.001138 \text{ m}^3/\text{kg})[(15,000 - 1200) \text{ kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 15.70 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{\text{pompa II,g}} = (798.33 + 15.70) \text{ kJ/kg} = 814.03 \text{ kJ/kg}$$

$$5 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_5 = 15 \text{ MPa} \\ T_5 = 600^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_5 = 3583.1 \text{ kJ/kg} \\ s_5 = 6.6796 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array}$$

$$6 \text{ Hali: } \left. \begin{array}{l} P_6 = 1.2 \text{ MPa} \\ s_6 = s_5 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_6 = 2860.2 \text{ kJ/kg} \\ (T_6 = 218.4^\circ\text{C}) \end{array}$$

7 Hali: $P_7 = 10 \text{ kPa}$

$$s_7 = s_5 \quad x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.6796 - 0.6492}{7.4996} = 0.8041$$

$$h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 191.81 + 0.8041(2392.1) = 2115.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta \rightarrow \sum_g \dot{m}h = \sum_\zeta \dot{m}h$$

$$yh_6 + (1 - y)h_2 = 1(h_3)$$

Burada y , türbinden ayrılan buharın oranını ($= m_6/m_5$) göstermektedir. Bulunan entalpi değerleri yukarıdaki denklemde yerine konur ve y çözülürse,

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{798.33 - 193.01}{2860.2 - 193.01} = \mathbf{0.2270}$$

$$q_g = h_5 - h_4 = (3583.1 - 814.03) \text{ kJ/kg} = 2769.1 \text{ kJ/kg}$$

$$q_\zeta = (1 - y)(h_7 - h_1) = (1 - 0.2270)(2115.3 - 191.81) \text{ kJ/kg} \\ = 1486.9 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_\zeta}{q_g} = 1 - \frac{1486.9 \text{ kJ/kg}}{2769.1 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.463 \text{ veya } \% 46.3}$$

Ara buhar alma olmadan yapılan sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman ara buhar almanın çevrimin verimini % 43.0'ten % 46.3'e yükselttiği görülmektedir. Net işi 171 kJ/kg azalmakla birlikte çevrime verilen ısı da 607 kJ/kg azalmaktadır. Çevrimin ısı verimi artmaktadır.

Örnek 10-6

Buharlı bir güç santrali, ideal ara ısıtmalı ara buhar almalı Rankine çevrimine göre çalışmaktadır. Santralde biri açık diğeri kapalı olmak üzere iki besleme suyu ısıtıcısı bulunmaktadır ve ara ısıtma yapılmaktadır. Buhar türbine 15 Mpa basınç ve 600 °C sıcaklıkta girmektedir. Yoğuşturucu basıncı 10 kPa'dir. Buhar türbinde 4 MPa basınca genişledikten sonra bir bölümü ayrılarak kapalı besleme suyu ısıtıcısına gönderilmektedir. Bu buhar ısıtıcıda tümüyle yoğuştuğundan sonra bir pompayla 15 MPa basınca sıkıştırılmakta ve kazana giren besleme suyuyla karıştırılmaktadır. Geri kalan buhar yeniden 600 °C sıcaklığa ısıtılmakta ve daha sonra alçak basınç türbinine girmektedir. Burada yoğuşturucu basıncına genişleyen buharın bir bölümü 0.5 MPa basınçta ayrılarak açık besleme suyu ısıtıcısına gönderilmektedir. Türbinden ısıtıcılar için ayrılan buhar miktarlarını ve çevrimin ısı verimini hesaplayın.

$h_1 = 191.81 \text{ kJ/kg}$	$h_9 = 3155.0 \text{ kJ/kg}$
$h_2 = 192.30 \text{ kJ/kg}$	$h_{10} = 3155.0 \text{ kJ/kg}$
$h_3 = 640.09 \text{ kJ/kg}$	$h_{11} = 3674.9 \text{ kJ/kg}$
$h_4 = 643.92 \text{ kJ/kg}$	$h_{12} = 3014.8 \text{ kJ/kg}$
$h_5 = 1087.4 \text{ kJ/kg}$	$h_{13} = 2335.7 \text{ kJ/kg}$
$h_6 = 1087.4 \text{ kJ/kg}$	$w_{\text{pompa I,g}} = 0.49 \text{ kJ/kg}$
$h_7 = 1101.2 \text{ kJ/kg}$	$w_{\text{pompa II,g}} = 3.83 \text{ kJ/kg}$
$h_8 = 1089.8 \text{ kJ/kg}$	$w_{\text{pompa III,g}} = 13.77 \text{ kJ/kg}$

Kapalı besleme suyu ısıtıcısı:

$$\begin{aligned}\dot{E}_g &= \dot{E}_\varsigma \\ yh_{10} + (1 - y)h_4 &= (1 - y)h_5 + yh_6 \\ y &= \frac{h_5 - h_4}{(h_{10} - h_6) + (h_5 - h_4)} = \frac{1087.4 - 643.92}{(3155.0 - 1087.4) + (1087.4 - 643.92)} = \mathbf{0.1766}\end{aligned}$$

Açık besleme suyu ısıtıcısı:

$$\begin{aligned}\dot{E}_g &= \dot{E}_\varsigma \\ zh_{12} + (1 - y - z)h_2 &= (1 - y)h_3 \\ z &= \frac{(1 - y)(h_3 - h_2)}{h_{12} - h_2} = \frac{(1 - 0.1766)(640.09 - 192.30)}{3014.8 - 192.30} = \mathbf{0.1306}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_g &= \dot{E}_\varsigma \\ (1)h_8 &= (1 - y)h_5 + yh_7 \\ h_8 &= (1 - 0.1766)(1087.4) \text{ kJ/kg} + 0.1766(1101.2) \text{ kJ/kg} = 1089.8 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_g &= (h_9 - h_8) + (1 - y)(h_{11} - h_{10}) \\
 &= (3583.1 - 1089.8) \text{ kJ/kg} + (1 - 0.1766)(3674.9 - 3155.0) \text{ kJ/kg} \\
 &= 2921.4 \text{ kJ/kg} \\
 q_\zeta &= (1 - y - z)(h_{13} - h_1) \\
 &= (1 - 0.1766 - 0.1306)(2335.7 - 191.81) \text{ kJ/kg} \\
 &= 1485.3 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_\zeta}{q_g} = 1 - \frac{1485.3 \text{ kJ/kg}}{2921.4 \text{ kJ/kg}} = 0.492 \text{ veya } \% 49.2$$

Tartışma Aynı basınç ve sıcaklık sınırları için, ara ısıtmanın uygulandığı fakat ara buhar almanın (rejenerasyon) yapılmadığı ideal Rankine çevrimi için çözülmüştü. Sonuçlar karşılaştırıldığında, ara buhar almanın, çevrimin ısıl verimini **%45.0'dan %49.2'ye** yükselttiği görülebilir.

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_g} = \frac{w_{turb,\zeta} - w_{pompa,g}}{q_g}$$

$$w_{turb,\zeta} = (h_9 - h_{10}) + (1 - y)(h_{11} - h_{12}) + (1 - y - z)(h_{12} - h_{13})$$

$$w_{pompa,g} = (1 - y - z)w_{pompa I,g} + (1 - y)w_{pompa II,g} + (y)w_{pompa III,g}$$

Eğer besleme suyunun, kapalı besleme suyu ısıtıcısından 15 MPa basınçta doymuş sıvı olarak ayrıldığı varsayılırsa, ısıl verimin **%50.6** olacağı gösterilebilir.

BUHARLI GÜÇ ÇEVİRİMLERİNİN İKİNCİ YASA ÇÖZÜMLEMESİ

Sürekli-akışlı sistemlerde ekserji

$$\dot{X}_{\text{yok olan}} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} = T_0 (\dot{S}_{\text{ç}} - \dot{S}_{\text{g}}) = T_0 \left(\sum_{\text{ç}} \dot{m}s + \frac{\dot{Q}_{\text{ç}}}{T_{\text{sin,ç}}} - \sum_{\text{g}} \dot{m}s - \frac{\dot{Q}_{\text{g}}}{T_{\text{sin,g}}} \right) \quad (\text{kW})$$

Sürekli akışlı, bir girişli, bir çıkışlı

$$x_{\text{tz}} = T_0 s_{\text{üretim}} = T_0 \left(s_{\text{ç}} - s_{\text{g}} + \frac{q_{\text{ç}}}{T_{\text{sin,ç}}} - \frac{q_{\text{g}}}{T_{\text{sin,g}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Bir çevrimin ekserjisi

$$x_{\text{tz}} = T_0 \left(\sum \frac{q_{\text{ç}}}{T_{\text{sin,ç}}} - \sum \frac{q_{\text{g}}}{T_{\text{sin,g}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

T_H sıcaklığındaki bir kaynak ve T_L sıcaklığındaki bir kuyu ile ısı alışverişinde bulunan bir çevrim için tersinmezlik

$$x_{\text{tz}} = T_0 \left(\frac{q_{\text{ç}}}{T_L} - \frac{q_{\text{g}}}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Belirli bir hal için akışın ekserjisi

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

Örnek 10-7

Basit ideal Rankine çevrimine göre çalışan, buharlı bir güç santralinde buhar, türbine 3 MPa basınç ve 350 °C sıcaklıkta girmekte ve 75 kPa basınçta yoğunlaşmaktadır. Toplam olarak çevrim için tersinmezliği hesaplayın. Ayrıca türbinden çıkan buharın kullanılabilirliğini hesaplayın. Çevrimin ısı aldığı ortamın veya kazanın 1600 K sıcaklıkta olduğunu, çevrimden ısı atılan ortamın ise 290 K sıcaklık ve 100 kPa basınçta bulunduğunu kabul edin

$$x_{tz,12} = 0 \quad \text{ve} \quad x_{tz,34} = 0$$

$$s_2 = s_1 = s_f @ 75 \text{ kPa} = 1.2132 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$s_4 = s_3 = 6.7450 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (3 \text{ MPa}, 350 \text{ °C'de})$$

$$\begin{aligned} x_{tz,23} &= T_0 \left(s_3 - s_2 - \frac{q_{g,23}}{T_{\text{kaynak}}} \right) \\ &= (290 \text{ K}) \left[(6.7450 - 1.2132) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} - \frac{2728.6 \text{ kJ/kg}}{1600 \text{ K}} \right] \\ &= 1110 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{tz,41} &= T_0 \left(s_1 - s_4 + \frac{q_{\zeta,41}}{T_{\text{kuyu}}} \right) \\ &= (290 \text{ K}) \left[(1.2132 - 6.7450) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} + \frac{2018.6 \text{ kJ/kg}}{290 \text{ K}} \right] = 414 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{\text{tz},\text{çevrim}} &= x_{\text{tz},12} + x_{\text{tz},23} + x_{\text{tz},34} + x_{\text{tz},41} \\
 &= 0 + 1110 \text{ kJ/kg} + 0 + 414 \text{ kJ/kg} \\
 &= \mathbf{1524 \text{ kJ/kg}}
 \end{aligned}$$

Türbinden çıkan buharın kullanılabilirliği (iş potansiyeli), kinetik ve potansiyel enerjileri ihmal edilirse,

$$\begin{aligned}
 \psi_4 &= (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0) + \frac{V_4^2}{2} + gz_4 \\
 &= (h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0)
 \end{aligned}$$

$$h_0 = h_{@ \text{ 290 K, 100 kPa}} \cong h_f @ \text{ 290 K} = 71.355 \text{ kJ/kg}$$

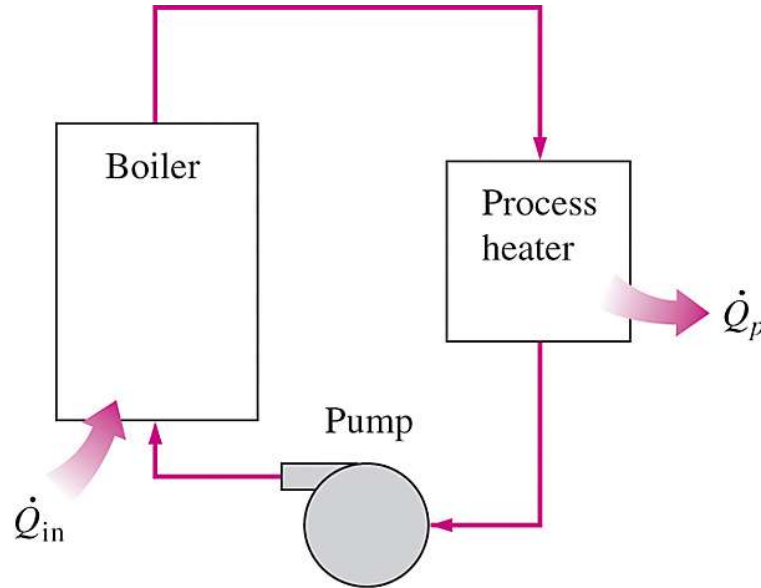
$$s_0 = s_{@ \text{ 290 K, 100 kPa}} \cong s_f @ \text{ 290 K} = 0.2533 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_4 &= (2403.0 - 71.355) \text{ kJ/kg} - (290 \text{ K})[(6.7450 - 0.2533) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] \\
 &= \mathbf{449 \text{ kJ/kg}}
 \end{aligned}$$

Başka bir deyişle, türbinden çıkan buhar eğer tersinir olarak çevre koşullarına getirilebilirse, 449.9 kJ/kg iş elde etmek mümkün olur. Bu değer çevrimin net işinin % 70'idir.

KOJENERASYON

Mühendislik sistemlerinin büyük bir bölümü, enerji girdisi olarak, enerjinin ısı enerjisi biçimine gereksinim duyar. Bu ısıya **proses ısısı** denir. Bu endüstrilerdeki proses ısısı genellikle 5 ile 7 atm basınç ve 150 ile 200°C sıcaklıklar arasındaki buharla sağlanır. Buharı oluşturmak için gerekli ısı genellikle kömür, petrol, doğal gaz veya başka bir yakıtın bir kazanda yakılmasıyla elde edilir.



Isıl işlemlerin yoğun olduğu endüstriler aynı zamanda büyük miktarlarda elektrik gücü de tüketirler.

Varolan iş potansiyelini atık ısı olarak atmak yerine, güç üretimi için kullanmak yerinde olur.

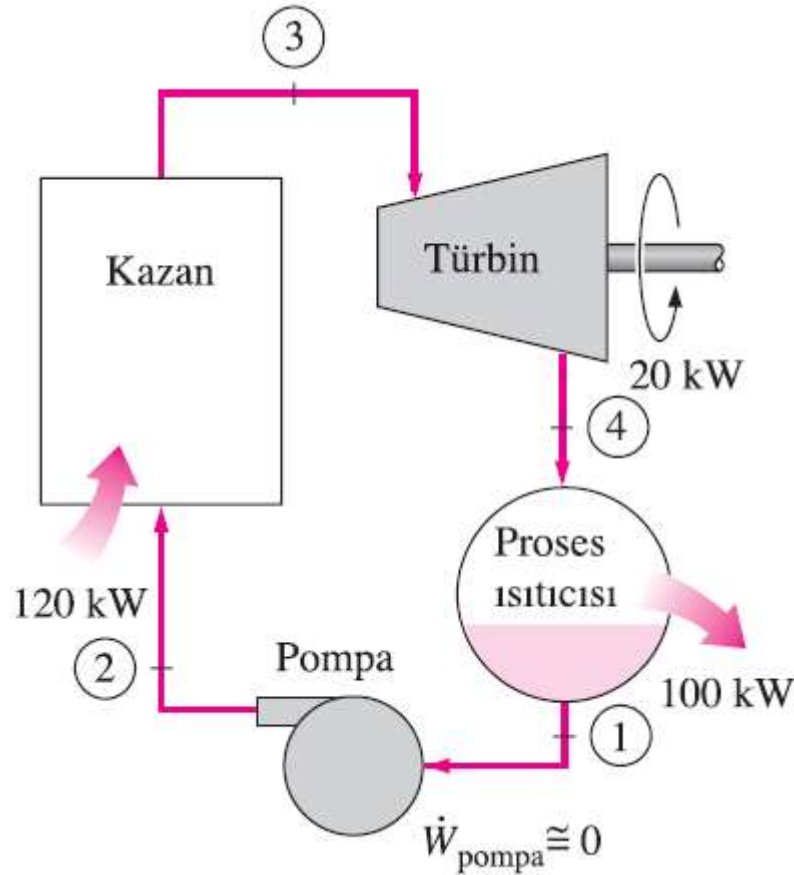
Belirli endüstriyel işlemler için proses-ısı gereksinimlerini karşılarken, aynı zamanda elektrik de üreten santraller geliştirilmiştir. geliştirilmiştir. Bu santrallere bileşik ısı-güç (kojenerasyon) santralleri denir.

Kojenerasyon: Enerjinin birden fazla yararlı biçiminin (proses ısısı ve elektrik gücü gibi) aynı enerji kaynağından üretilmesidir.

Enerjiden yararlanma oranı

$$\epsilon_v = \frac{\text{Üretilen net güç} + \text{Proses ısısı}}{\text{Girilen toplam ısı}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_g}$$

$$\epsilon_y = 1 - \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_g}$$

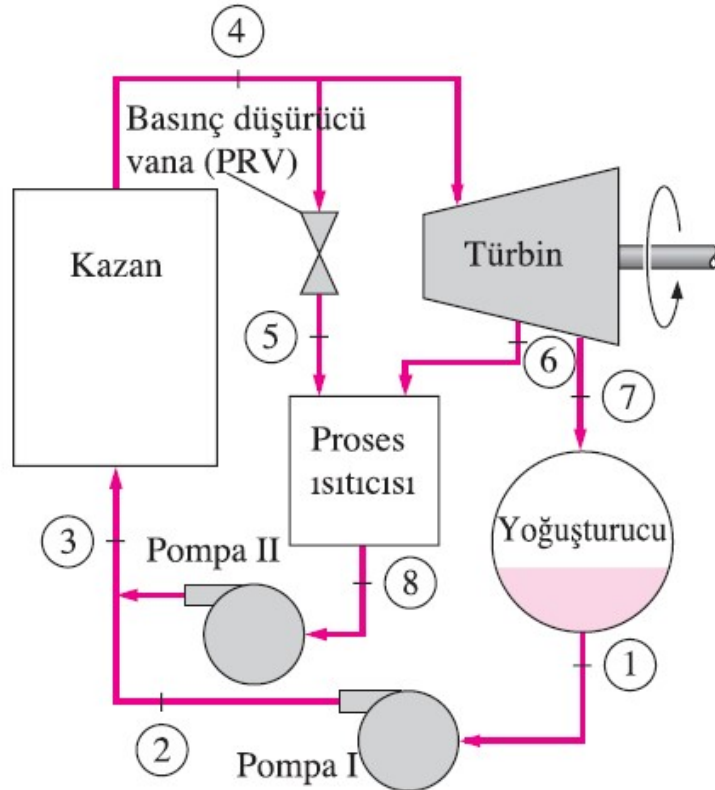


Buhar türbinli ideal bileşik ısı-güç santralinin enerjiden yararlanma oranı, yüzde 100 olmaktadır.

Gerçek bileşik ısı-güç santrallerinde bu oran yüzde 80 düzeylerindedir.

Bazı yeni bileşik ısı-güç santrallerinde enerjiden yararlanma oranı daha yüksek değerlere de çıkabilmektedir.

İdeal bileşik ısı-güç (kojenerasyon) santrali.



Değişen yüklere cevap verebilen bir bileşik ısı-güç santrali.

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_7(h_7 - h_1)$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_8h_8$$

$$\dot{W}_{\text{türb}} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_4 - h_6) + \dot{m}_7(h_6 - h_7)$$

Proses ısı yükünün fazla olduğu zamanlarda buharın tümü proses-ısı birimine yönlendirilir. Bu durumda yoğuşturucuya buhar gitmez ($\dot{m}_7=0$) ve atık ısı sıfır olur.

Bu da yeterli olmazsa, kazandan çıkan buharın bir kısmı bir kısılma vanasıyla veya bir basınç düşürücü vanayla (PRV) P6 basıncına genişletilerek proses-ısı birimine gönderilir.

En yüksek miktarda proses ısı, kazandan çıkan tüm buharın basınç düşürücü vanadan geçirilmesiyle sağlanır ($\dot{m}_5 = \dot{m}_4$) Bu durumda güç üretimi yoktur.

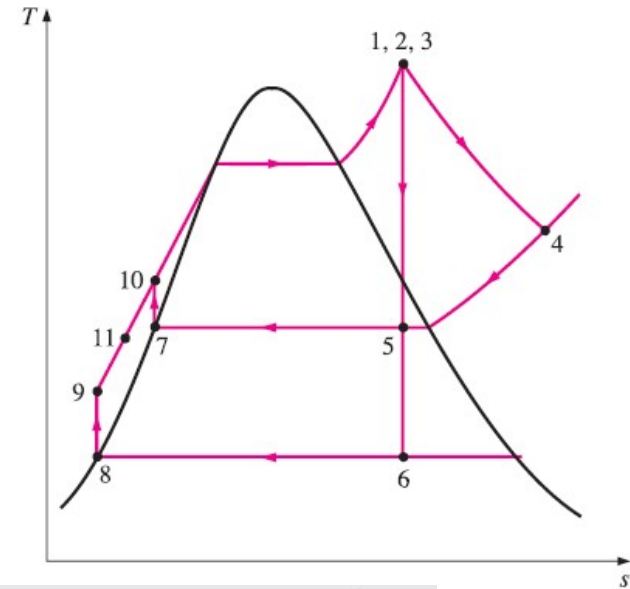
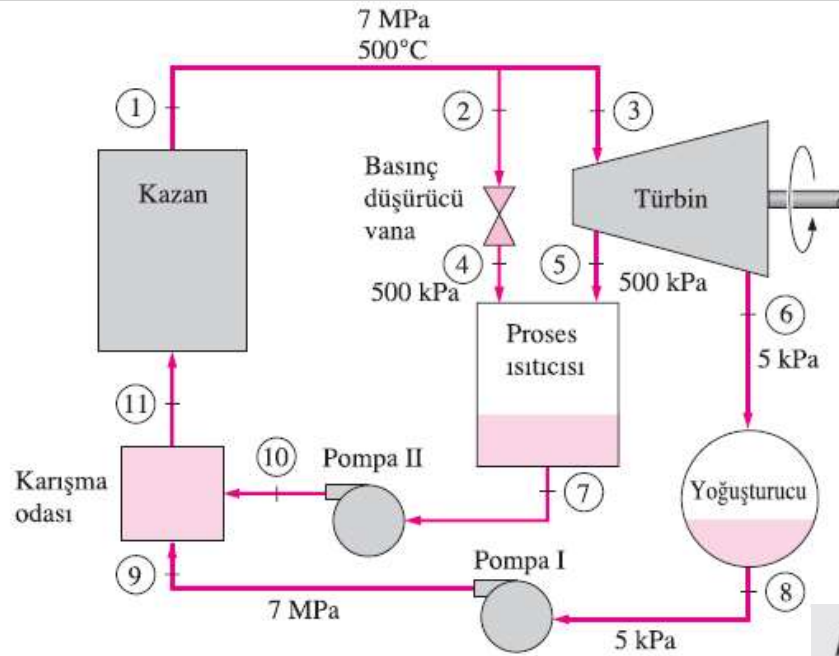
Proses ısına gerek duyulmadığında ise, buharın tümü türbin ve yoğuşturucudan geçer ($\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = 0$), ve bileşik ısı-güç santrali bu kez sıradan bir buharlı güç santrali olarak çalışır.

Örnek 10-8

Bir bileşik ısı güç santralini gözönüne alalım. Buhar türbine 7 MPa basınç ve 500 °C sıcaklıkta girmektedir. Türbinden bir miktar buhar, 500 kPa basınçta ısı işlemler için ayrılmaktadır. Buharın geri kalan bölümü 5 kPa yoğuşturucu basıncına genişlemekte, bu basınçta yoğuşuktan sonra 7 MPa kazan basıncına pompalanmaktadır. Fazla proses ısı gerektği zamanlarda kazandan çıkan buharın bir bölümü doğrudan bir basınç düşürücü vanadan geçirilerek, 500 kPa basınca düşürülmekte ve ısı değiştiricisine gönderilmektedir. Isı değiştiricisinde yoğuşan buhar, buradan her zaman doymuş sıvı olarak çıkmakta ve daha sonra 7 Mpa basınca pompalanarak kazan besleme suyuyla karıştırılmaktadır. Kazandan akan suyun debisi 15 kg/s'dir. Türbin ve pompalar izantropik kabul edilebilir. Borulardaki basınç düşüşlerini ve ısı kayıplarını ihmal ederek, (a) birim zamanda sağlanabilecek en çok proses ısını, (b) proses ısı sağlanmadığı zaman üretilen gücü ve enerjiden yararlanma oranını, (c) buharın yüzde 10'u türbine girmeden önce, yüzde 70'i de türbinden ayrılarak proses ısı değiştiricisine gönderildiği zaman sağlanan proses ısını hesaplayın.

$$\begin{aligned}w_{\text{pompa I,g}} &= v_8(P_9 - P_8) = (0.001005 \text{ m}^3/\text{kg})[(7000 - 5)\text{kPa}]\left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}\right) \\&= 7.03 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_{\text{pompa II,g}} &= v_7(P_{10} - P_7) = (0.001093 \text{ m}^3/\text{kg})[(7000 - 500) \text{ kPa}]\left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}\right) \\&= 7.10 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$



$$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 3411.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = 2739.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 2073.0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = h_f @ 500 \text{ kPa} = 640.09 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 = h_f @ 5 \text{ kPa} = 137.75 \text{ kJ/kg}$$

$$h_9 = h_8 + w_{\text{pompa I,g}} = (137.75 + 7.03) \text{ kJ/kg} = 144.78 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} = h_7 + w_{\text{pompa II,g}} = (640.09 + 7.10) \text{ kJ/kg} = 647.19 \text{ kJ/kg}$$

(a) En fazla proses ısısı, kazanda üretilen tüm buhar basınç düşürücü bir vanadan geçirilip ısı değiştiricisine gönderildiği zaman elde edilir. Bu durumda,

$$\dot{Q}_{p,\text{maks}} = \dot{m}_1(h_4 - h_7) = (15 \text{ kg/s})[(3411.4 - 640.09) \text{ kJ/kg}] = \mathbf{41570 \text{ kW}}$$

(b) Proses ısısı sağlanmadığı zaman kazanda üretilen tüm ısı türbinden geçerek 5 kPa olan yoğunlaştırucu basıncına genişleyecektir. Bu durumda,

$$\dot{W}_{\text{türb},\zeta} = \dot{m}(h_3 - h_6) = (15 \text{ kg/s})[(3411.4 - 2073.0) \text{ kJ/kg}] = 20076 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{pompa},g} = (15 \text{ kg/s})(7.03 \text{ kJ/kg}) = 105 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{net},\zeta} = \dot{W}_{\text{türb},\zeta} - \dot{W}_{\text{pompa},g} = (20076 - 105) \text{ kW} = 19971 \text{ kW} \cong \mathbf{20.0 \text{ MW}}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_1(h_1 - h_{11}) = (15 \text{ kg/s})[(3411.4 - 144.78) \text{ kJ/kg}] = 48999 \text{ kW}$$

$$\epsilon_y = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_g} = \frac{(19971 + 0) \text{ kW}}{48999 \text{ kW}} = \mathbf{0.408 \text{ veya } \% 40.8}$$

(c) Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilerek, enerji korunumu ilkesi proses ısı değiştiricisine uygulanırsa,

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{Q}_{p,\zeta} + \dot{m}_7 h_7$$

$$\dot{Q}_{p,\zeta} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_7 h_7$$

$$\dot{m}_4 = (0.1)(15 \text{ kg/s}) = 1.5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_5 = (0.7)(15 \text{ kg/s}) = 10.5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 = 1.5 + 10.5 = 12 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{p,\zeta} &= (1.5 \text{ kg/s})(3411.4 \text{ kJ/kg}) + (10.5 \text{ kg/s})(2739.3 \text{ kJ/kg}) \\ &\quad - (12 \text{ kg/s})(640.09 \text{ kJ/kg}) \\ &= \mathbf{26.2 \text{ MW}} \text{ olur.}\end{aligned}$$

Başka bir deyişle 26184 kVW ısı işlemlerde kullanılacaktır. Bu çalışma düzeninde üretilen güç hesaplanırsa 10299 kW bulunur. Bu durumda kazanda çevrime verilen ısı 42951 kW, enerjiden yararlanma oranı da yüzde 84.9 olmaktadır.

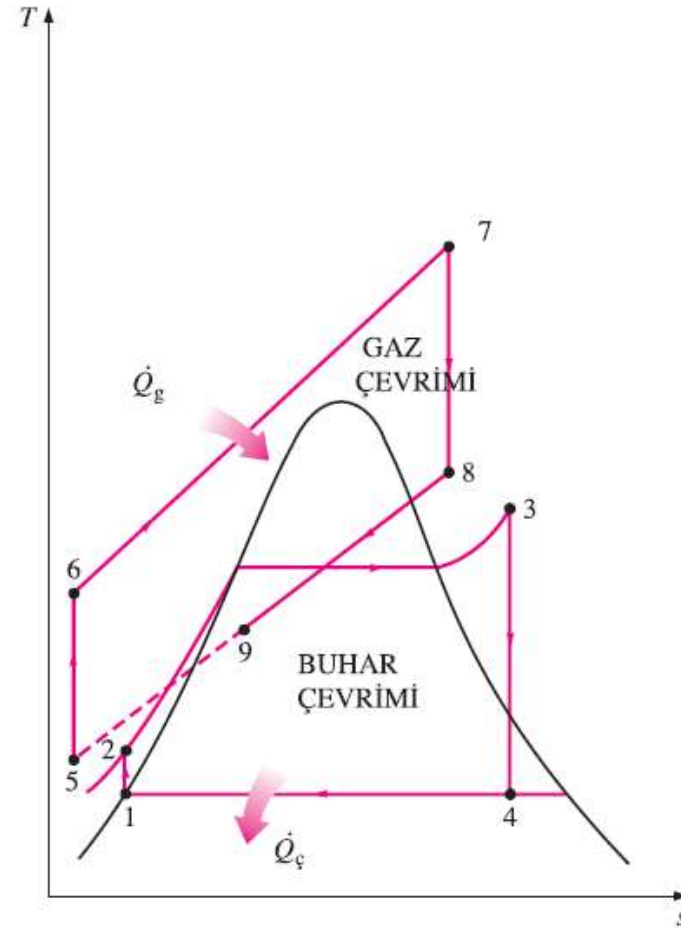
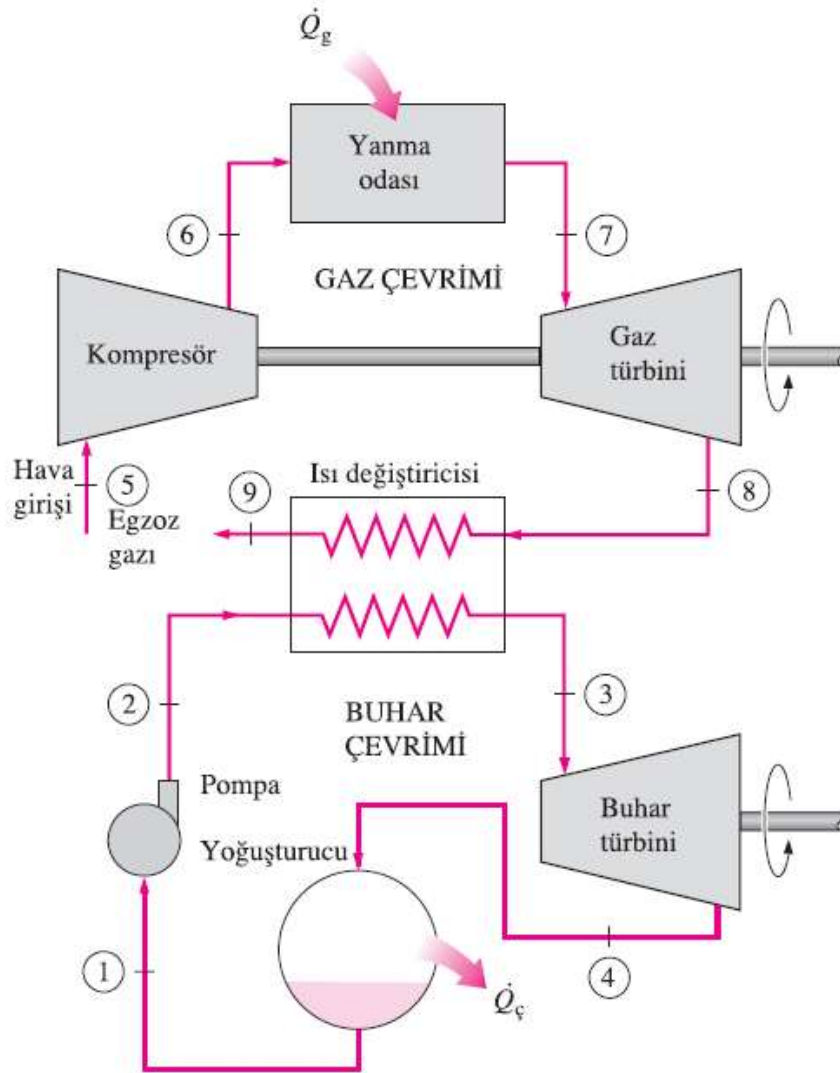
BİRLEŞİK GAZ – BUHAR GÜÇ ÇEVİRİMİ

Daha yüksek ısı verim sağlayabilmek için süregelen çalışmalar, alışılmış güç santrallerinde yeni düzenlemelerin yapılmasına yol açmıştır.

Daha çok kabul gören bir başka düzenleme ise, gaz akışkanlı güç çevrimini buharlı bir güç çevriminin üst çevrimi olarak kullanmaktır. Bu düzenleme birleşik gaz buhar çevrimi veya kısaca birleşik çevrim olarak adlandırılır.

En çok ilgi duyulan birleşik çevrim, gaz türbini (Brayton) çevrimiyle buhar türbini(Rankine) çevriminin oluşturduğu birleşik çevrimdir. Bu birleşik çevrimin ısı verimi, birleşik çevrimi oluşturan çevrimlerin ısı verimlerinden daha yüksek olmaktadır.

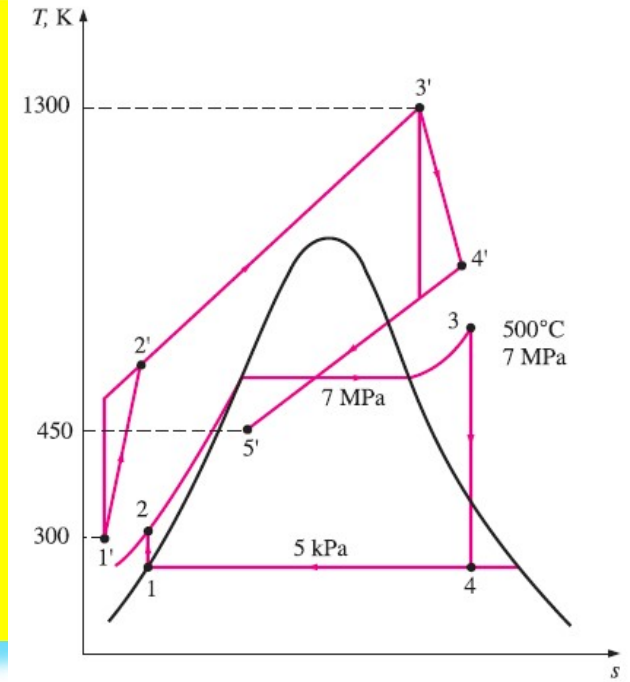
- Gaz türbini çevrimlerinin yüksek sıcaklıklarda çalışmasının sağladığı kazançlardan yararlanmak ve sıcak egzoz gazlarını, buharlı güç çevrimi gibi alt çevrimlerde değerlendirmek mühendislik yaklaşımının gereğidir. Bu düşüncenin ürünü birleşik gaz-buhar çevrimidir.
- Gaz türbini teknolojisinde son yıllarda görülen gelişmeler, birleşik gaz-buhar santrallerini ekonomik açıdan çok çekici yapmıştır.
- Birleşik çevrim yatırım giderlerini çok fazla artırmadan çevrimin veriminin artmasını sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak birçok yeni güç santrali birleşik çevrime göre tasarlanmakta var olan birçok buharlı ve gaz türbinli santral de birleşik santrale dönüştürülmektedir.
- Dönüşümü tamamlanan santrallerde ısı veriminin % 50'nin üzerinde olduğu bildirilmektedir



Birleşik gaz-buhar güç santrali.

Örnek 10-9

Şekilde gösterilen birleşik gaz-buhar güç çevrimini inceleyelim. Üst çevrim olan gaz türbini çevriminin basınç oranı 8 olup, hava kompresöre 300 K, türbine 1300 K sıcaklıkta girmektedir. Kompresörün adyabatik verimi yüzde 80, gaz türbininin adyabatik verimi yüzde 85'tir. Alt çevrim, 7 MPa ve 5 kPa basınç sınırları arasında çalışan basit ideal Rankine çevrimidir. Buhar, atık ısı kazanında, sıcak yanma sonu gazları tarafından 500 °C sıcaklığa ısıtılmaktadır. Yanma sonu gazları atık ısı kazanından 450 °C sıcaklıkta çıkmaktadır, a- Buhar ve gaz çevrimde dolaşan akışkanların kütleli debilerinin oranını, b- Birleşik çevrimin ısı verimini hesaplayın.



$$\text{Gaz çevrimi: } h_4' = 880.36 \text{ kJ/kg} \quad (T_4' = 853 \text{ K})$$

$$q_g = 790.58 \text{ kJ/kg} \quad w_{\text{net}} = 210.41 \text{ kJ/kg} \quad \eta_{\text{th}} = \% 26.6$$

$$h_5' = h_{@ 450 \text{ K}} = 451.80 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Buhar çevrimi: } h_2 = 144.78 \text{ kJ/kg} \quad (T_2 = 33^\circ\text{C})$$

$$h_3 = 3411.4 \text{ kJ/kg} \quad (T_3 = 500^\circ\text{C})$$

$$w_{\text{net}} = 1331.4 \text{ kJ/kg} \quad \eta_{\text{th}} = \% 40.8$$

(a) Kütle debilerinin oranı;

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta$$

$$\dot{m}_{gaz}h'_5 + \dot{m}_{buhar}h_3 = \dot{m}_{gaz}h'_4 + \dot{m}_{buhar}h_2$$

$$\dot{m}_{buhar}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{gaz}(h'_4 - h'_5)$$

$$\dot{m}_{buhar}(3411.4 - 144.78) = \dot{m}_{gaz}(880.36 - 451.80)$$

$$\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g} = y = \mathbf{0.131}$$

$$w_{net} = w_{net,gaz} + yw_{net,buhar}$$

$$= (210.41 \text{ kJ/kg gaz}) + (0.131 \text{ kg buhar/kg gaz})(1331.4 \text{ kJ/kg buhar})$$

$$= 384.8 \text{ kJ/kg gaz}$$

(b) Birleşik santralin ısı verimi

$$\eta_{isl} = \frac{w_{net}}{q_g} = \frac{384.8 \text{ kJ/kg gaz}}{790.6 \text{ kJ/kg gaz}} = \mathbf{0.487 \text{ veya } \% 48.7}$$

Birleşik santral, yanma odasında sağlanan enerjinin yüzde 48.7'sini yararlı işe dönüştürebilmektedir. Dikkat edilirse bu değer daha önce gaz türbini çevrimi için bulunan yüzde 26.6'nın ve buhar çevrimi için bulunan yüzde 40.7'nin üzerindedir.





ÖZET

- Carnot buhar çevrimi
- Rankine çevrimi: Buharlı güç çevrimleri için ideal çevrim
 - İdeal Rankine çevriminin enerji çözümlemeleri
- Gerçek buharlı güç çevriminin ideal buharlı güç çevriminden farkı
- Rankine çevriminin verimini nasıl artırabiliriz?
 - Yoğuşturucu basıncının düşürülmesi
 - Buharın kızdırılması
 - Kazan basıncının yükseltilmesi
- İdeal ara ısıtmalı Rankine çevrimi
- İdeal rejenerasyonlu Rankine çevrimi
 - Açık besleme suyu ısıtıcıları
 - Kapalı besleme suyu ısıtıcıları
- Buharlı güç çevrimlerinin ikinci yasa analizi
- Kojenerasyon
- Birleşik gaz buhar çevrimleri