

BUHARLI VE BİRLEŐİK GÜÇ ÇEVİRİMLERİ

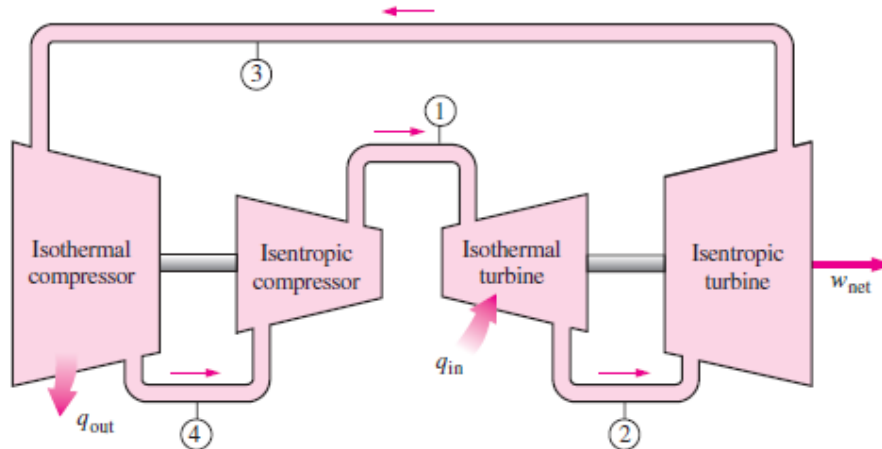
CARNOT BUHAR ÇEVİRİMİ

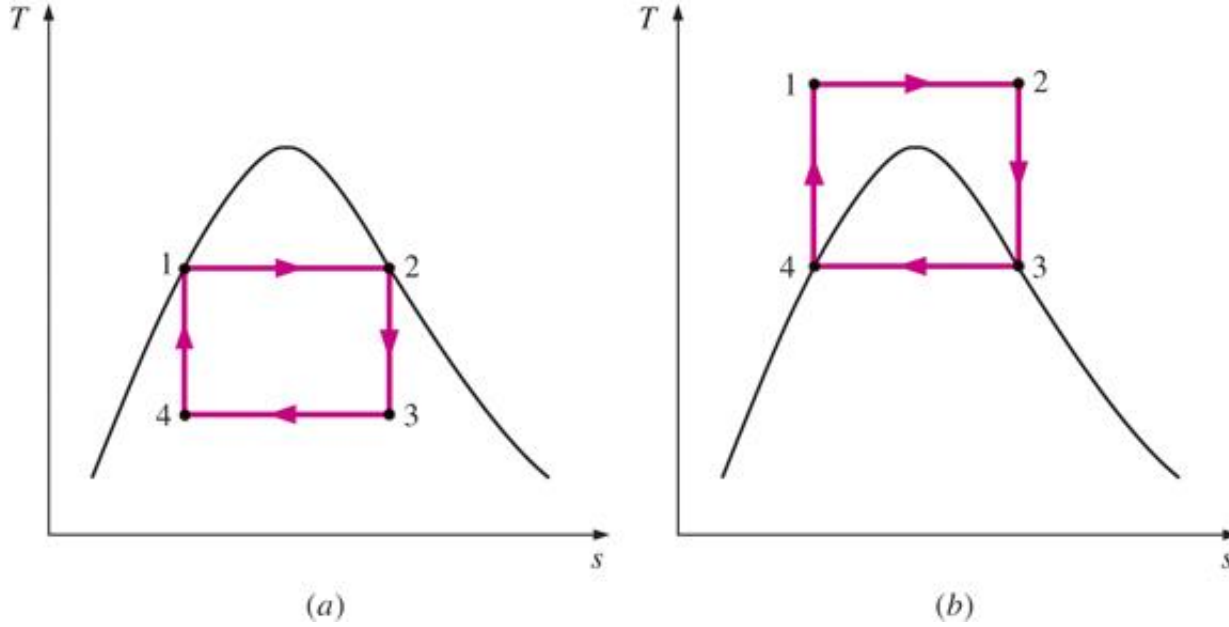
Belirli iki sıcaklık sınırı arasında çalışan en yüksek verimli çevrim Carnot çevrimidir buharlı güç santralleri için ideal bir çevrim değildir. Çünkü;

1-2 hal değişimi: Çevrimde kullanılacak en yüksek sıcaklığı önemli ölçüde kısıtlar (bu değer su için 374°C 'dir). Çevrimin en yüksek sıcaklığının bu şekilde sınırlanması, ısı veriminin 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, yoğuşmanın 4 halinde istenen kuruluk derecesine sahip olarak son bulacak şekilde hassas olarak kontrol edilmesi kolay değildir. İkincisi, iki fazlı akışkanı sıkıştırarak şekilde bir kompresörün tasarlanması uygulamada zordur.



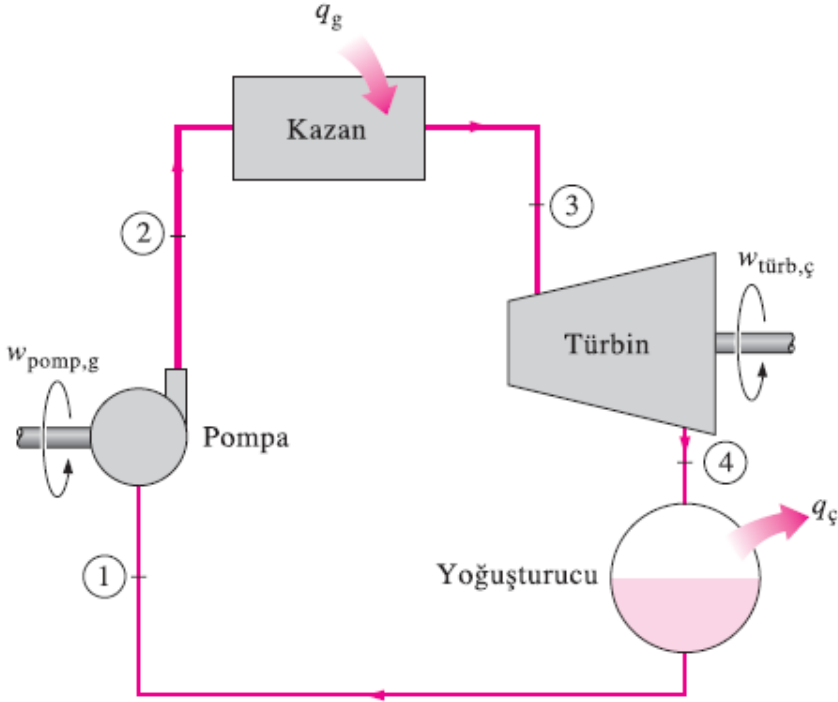


İki Carnot buhar çevriminin T-s diyagramları

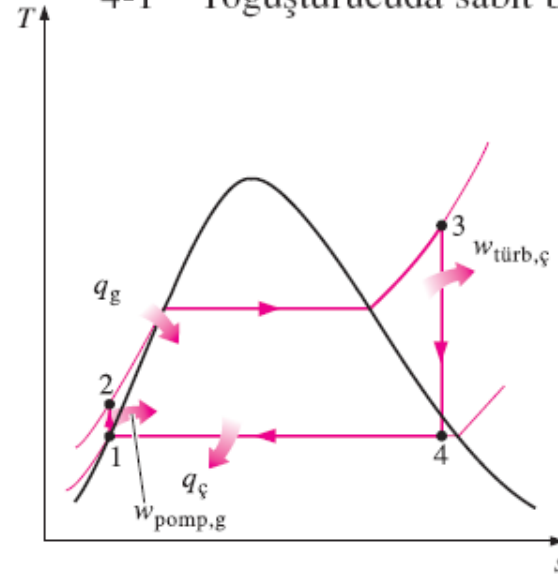
- 1-2** Kazanda izotermal ısı geçişi
- 2-3** Türbinde izantropik sıkıştırma
- 3-4** Kondenserde izotermal ısı çıkışı
- 4-1** Kompresörde izantropik sıkıştırma

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:



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

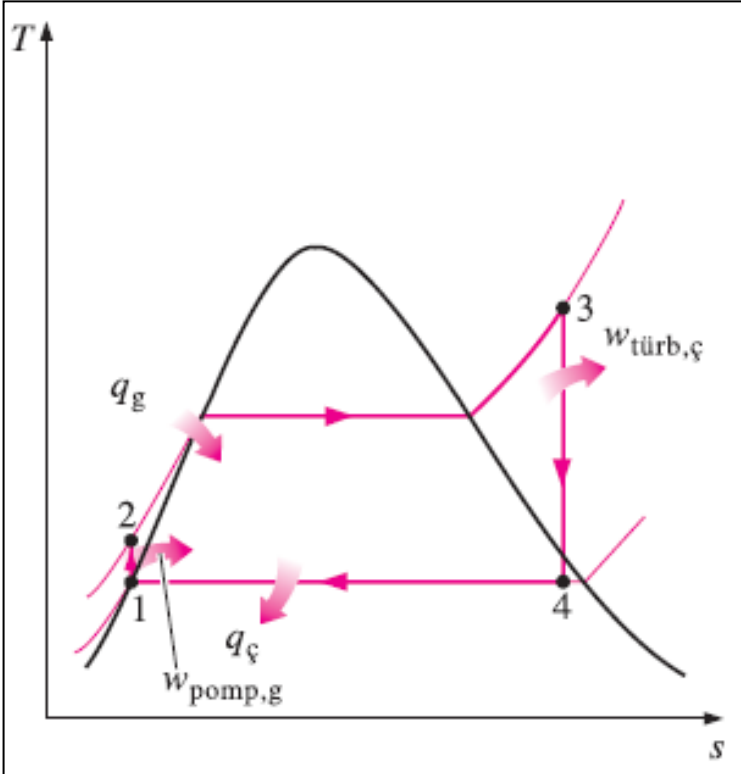


Basit ideal Rankine çevrimi

İdeal Rankine Çevriminin Enerji Çözümlemesi

Sürekli akışlı enerji denklemi

$$(q_g - q_ç) + (w_g - w_ç) = h_{çıkış} - h_{giriş}$$



Pompa ($q = 0$):

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

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

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

Kazan ($w = 0$):

$$q_g = h_3 - h_2$$

Türbin ($q = 0$):

$$w_{türb,ç} = h_3 - h_4$$

Yoğuşturucu ($w = 0$):

$$q_ç = h_4 - h_1$$

Rankine çevriminin ısı verimi

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{g}}} = 1 - \frac{q_{\text{ç}}}{q_{\text{g}}}$$

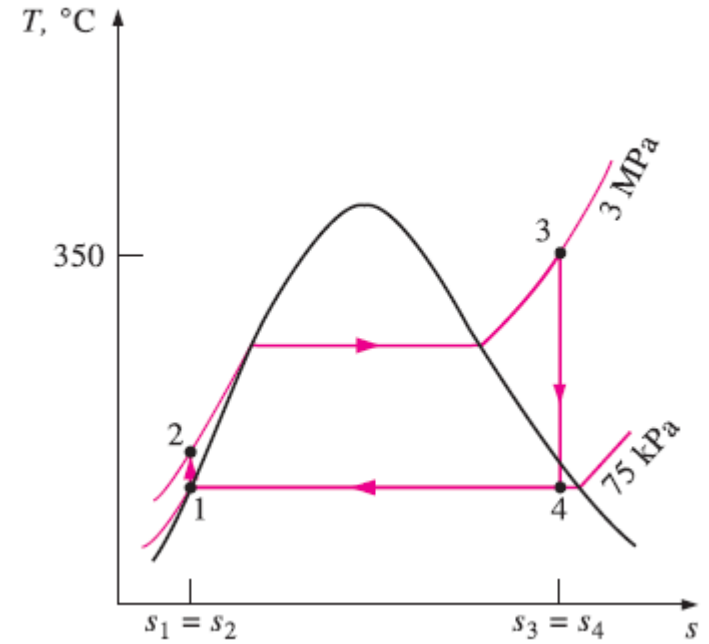
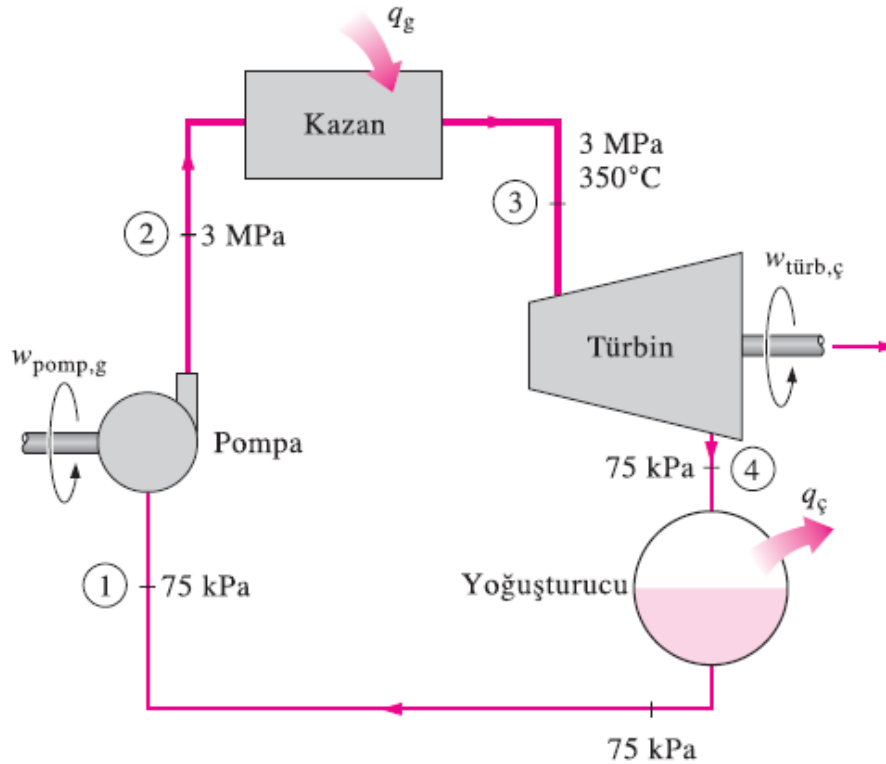
$$w_{\text{net}} = q_{\text{g}} - q_{\text{ç}} = w_{\text{türb,ç}} - w_{\text{pomp,g}}$$

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

Örnek

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 ısıl 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.



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

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

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

$$= 3.03 \text{ kJ/kg}$$

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

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

$$4 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_4 = 75 \text{ kPa} \\ \text{(Doymuş sıvı-buhar karışımı)} \end{array}$$

$$s_4 = s_3$$

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

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

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

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

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

Isıl verim aynı zamanda aşağıdaki gibi de hesaplanabilir:

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

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

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

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

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

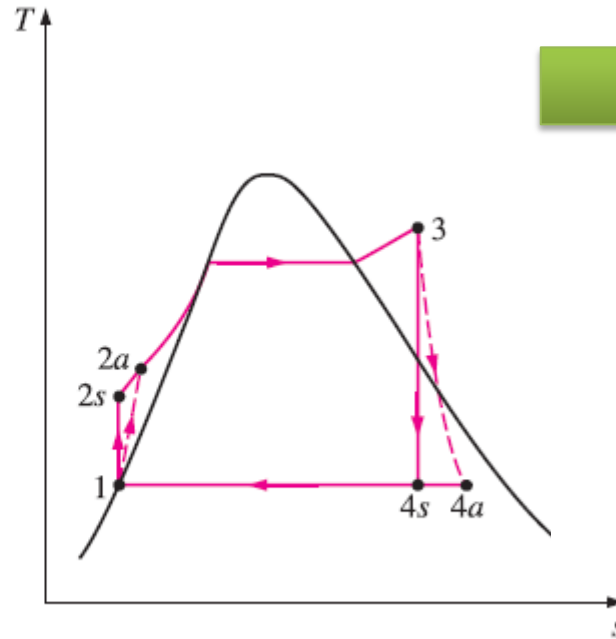
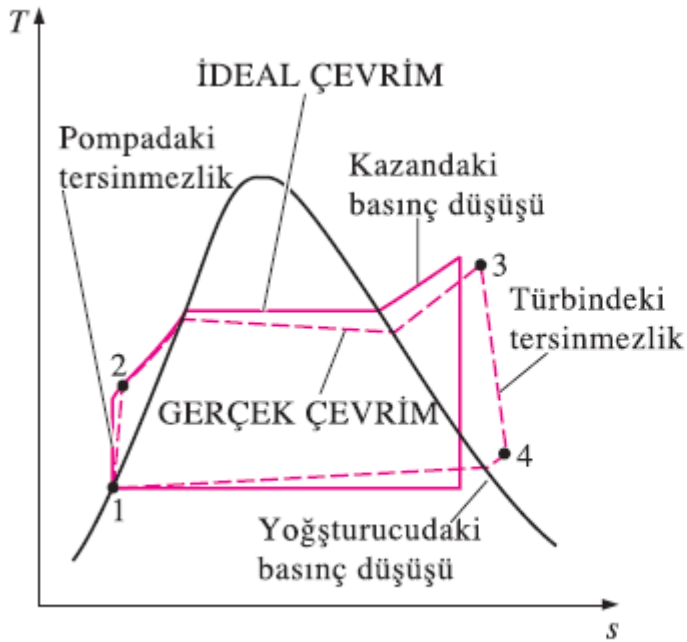
$$\eta_{\text{th,Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{maks}}} = 1 - \frac{(91.76 + 273) \text{ K}}{(350 + 273) \text{ K}} = 0.415$$

Böylece güç santrali kazanda aldığı ısının yüzde 26'sını net işe dönüştürülebilmektedir. Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek bir güç santralinin ısıl verimi sürtünme ve benzeri tersinmezliklerden dolayı daha az olacaktır.

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

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

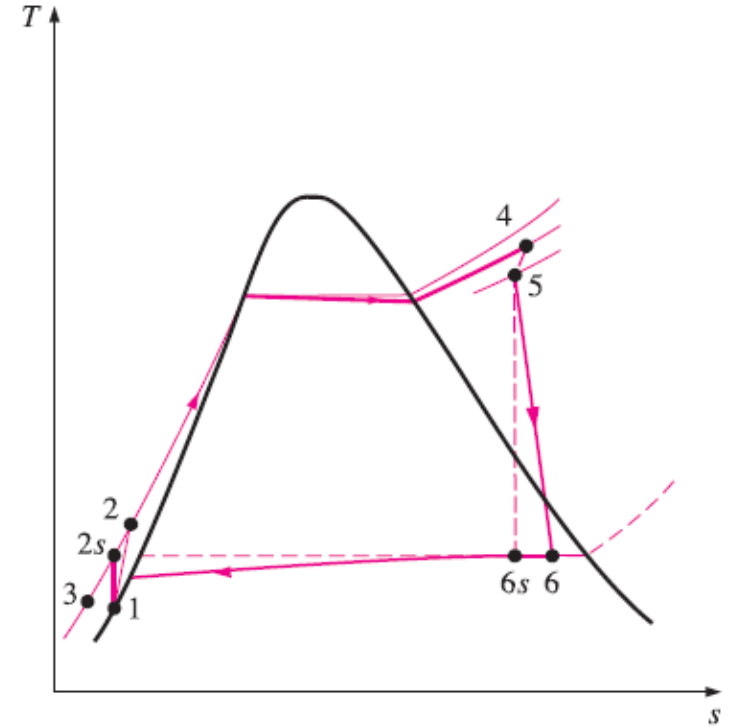
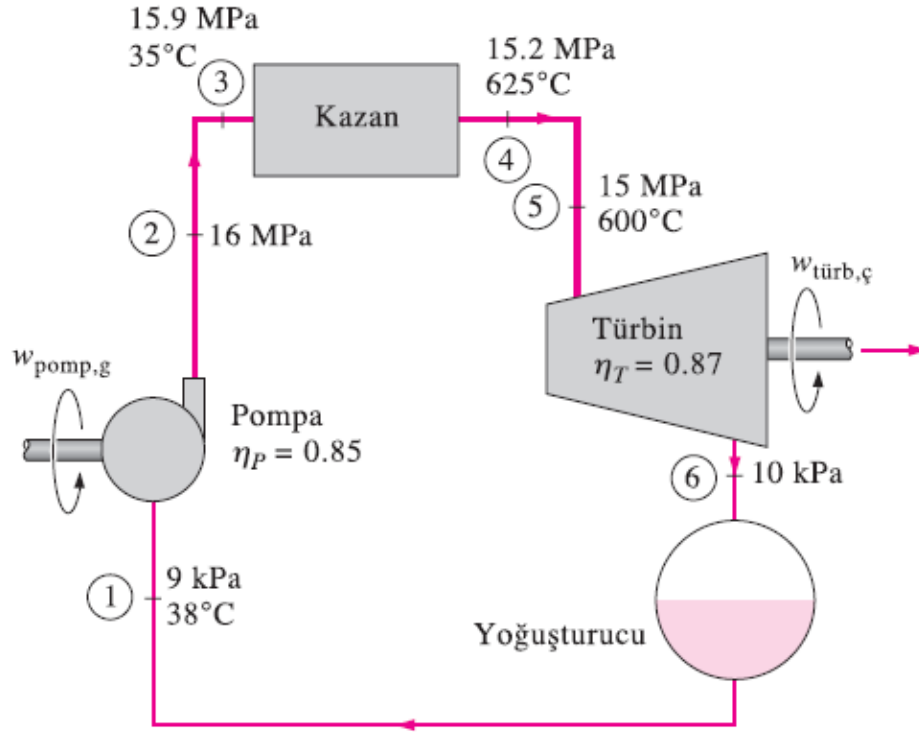
$$\eta_T = \frac{w_g}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4g}}{h_3 - h_{4s}}$$

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

Örnek

Bir buharlı güç santrali şekildeki çevrime göre çalışmaktadır. Türbinin ve pompanın adyabatik verimleri sırasıyla % 87 ve 85'tir. (a) Çevrimin ısı 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:

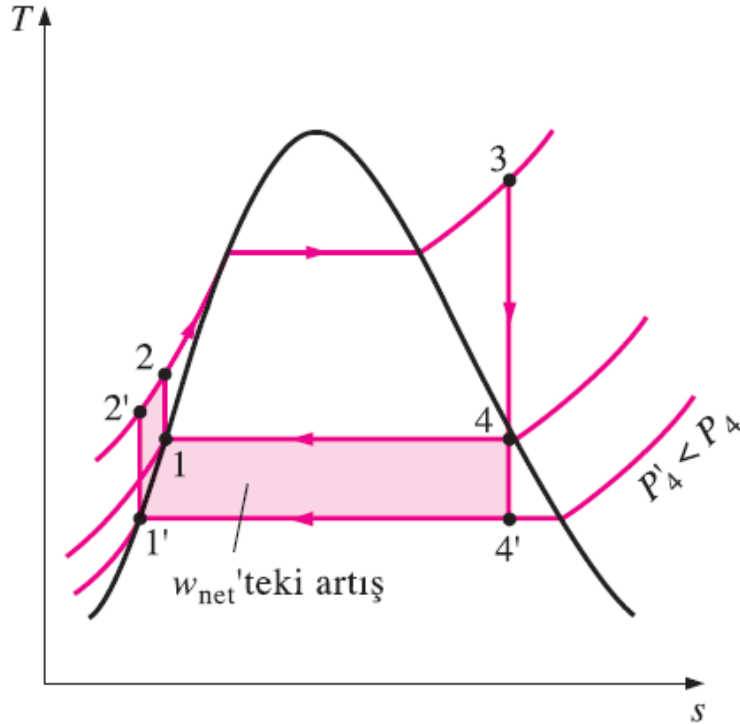
$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m}(w_{\text{net}}) = (15 \text{ kg/s})(1258.0 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{18.9 \text{ MW}}$$

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 yoğuşturucuda iş akışkanından ısının atıldığı ortalama sıcaklığın düşürülmesi" şeklinde özetlenebilir.

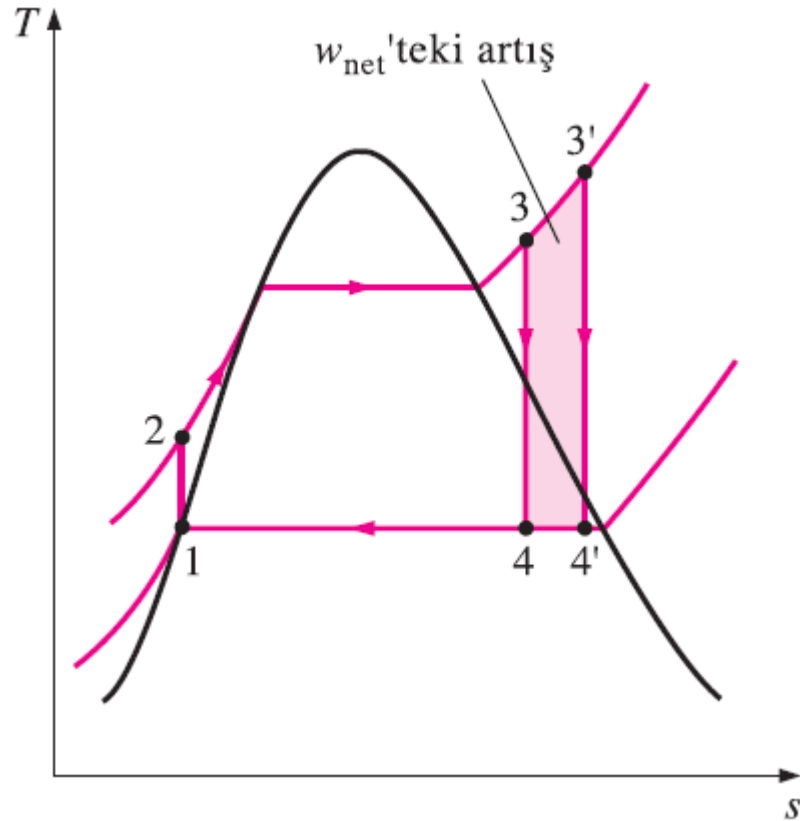
Yoğuşturucu Basıncının Düşürülmesi ($T_{L,ort}$ 'yi düşürür)



Düşük basınç sonucu ısı verimindeki artıştan yararlanmaya yönelik olarak buharlı güç santrallerindeki yoğuşturucular genellikle atmosfer basıncının oldukça altında çalıştırılırlar. Fakat yoğuşturucu 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 ($T_{H,ort}$ '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.

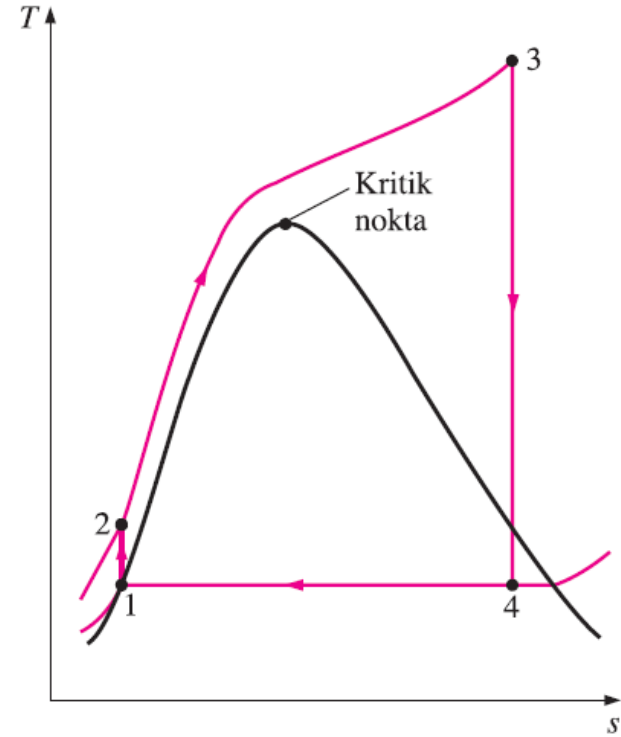
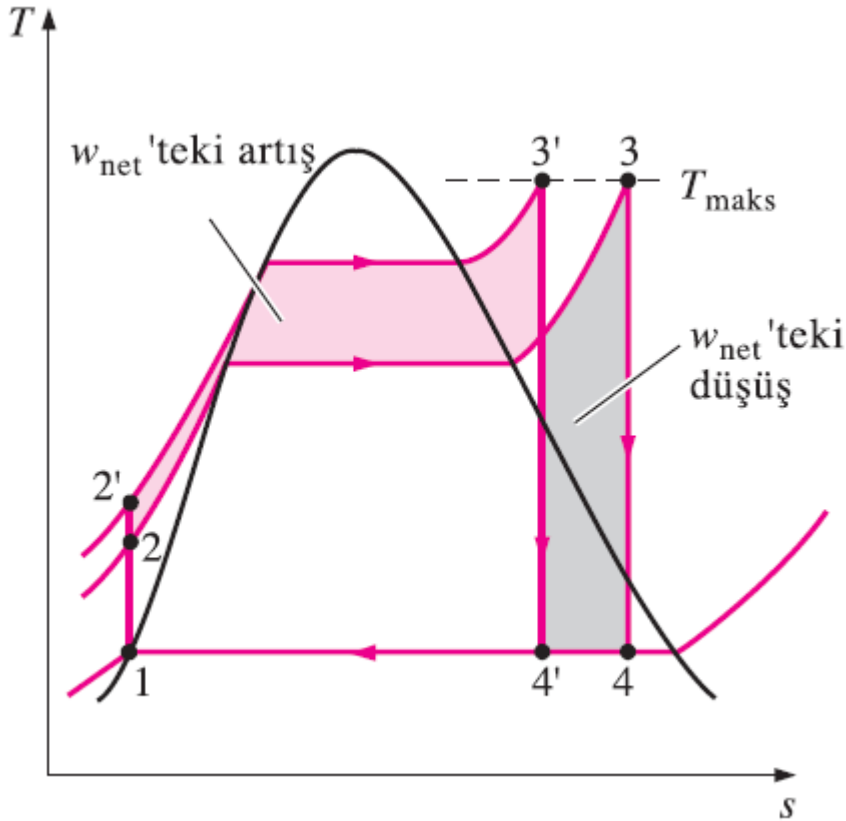
Kızdırma sonucu türbin çıkışındaki buharın kuruluk derecesi artmaktadır

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

Kazan Basıncının Yükseltilmesi ($T_{H,ort}$ '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.

Örnek

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

a- Santralin ısı verimi;

$$\begin{array}{l} 1 \text{ Hali:} \\ \left. \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \text{Doymuş sıvı} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = h_f @ 10 \text{ kPa} = 191.81 \text{ kJ/kg} \\ v_1 = v_f @ 10 \text{ kPa} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{l} 2 \text{ Hali:} \\ P_2 = 3 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}$$

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

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

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

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

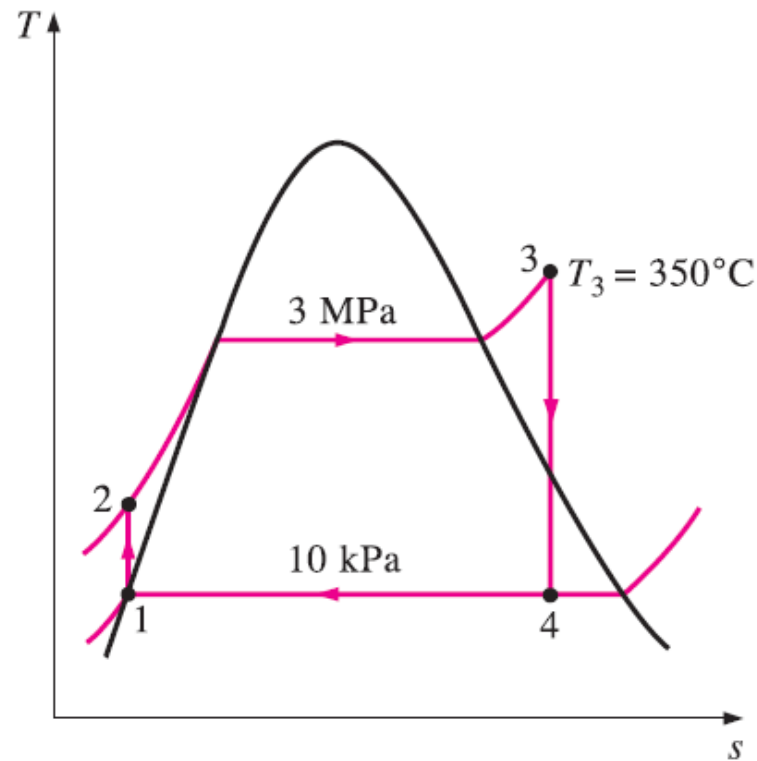
$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7450 - 0.6492}{7.4996} = 0.8128$$

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

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

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

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



(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:

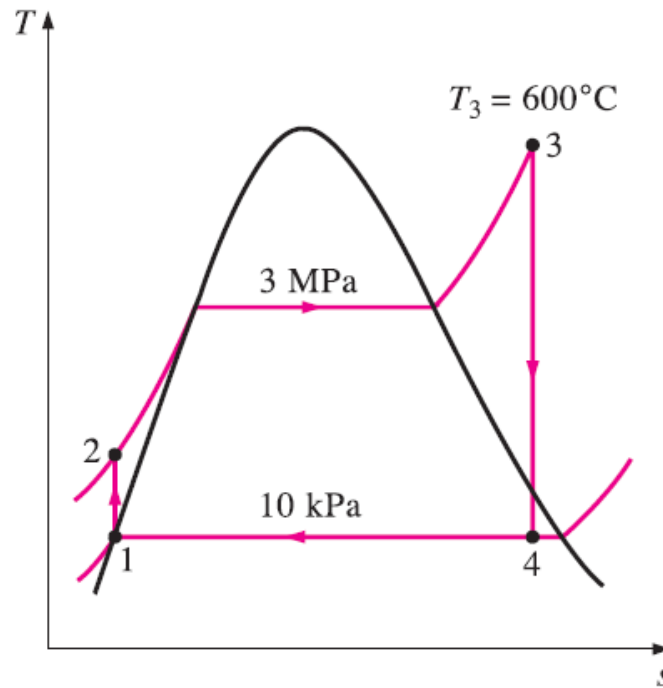
$$h_3 = 3682.8 \text{ kJ/kg}$$

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

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

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

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



(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 yukarıdaki benzer bir biçimde hesaplanabilir:

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

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

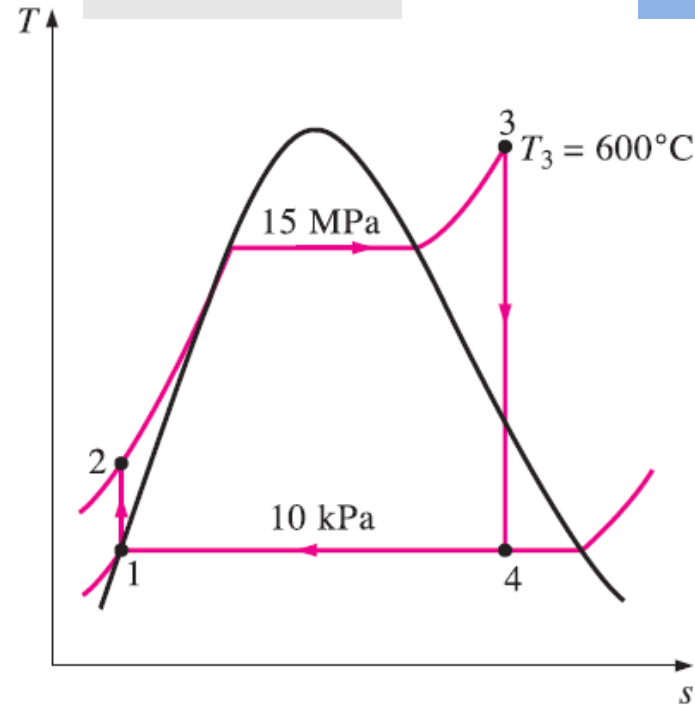
$$h_4 = 2115.3 \text{ kJ/kg}$$

$$(x_4 = 0.804)$$

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

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

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



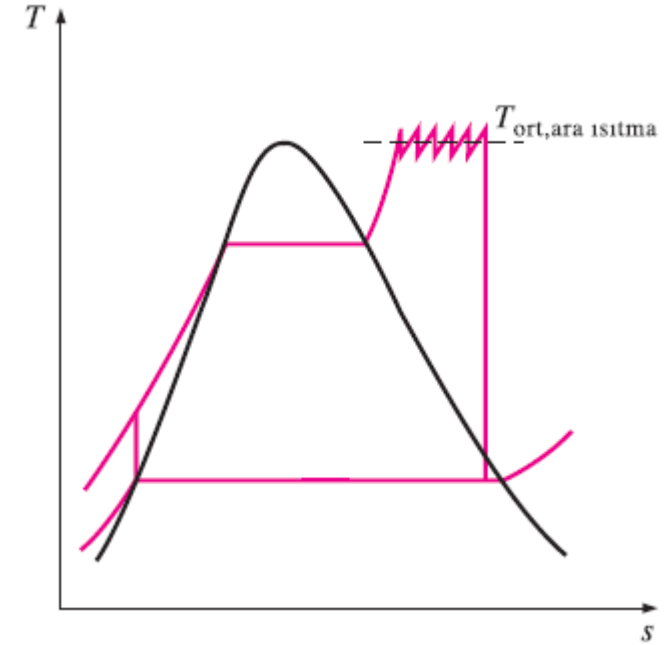
Türbin giriş sıcaklığı 600 °C'ta kalırken, kazan basıncını 3 MPa'den 15 MPa'e yükseltmek ısı verimi % 37.3'ten 43.0'e yükseltmektedir. Aynı zamanda, türbin çıkışında buharın kuruluk derecesi de 0.914'ten 0.804'e azalmaktadır. Başka bir deyişle, doymuş sıvı buhar karışımındaki sıvının miktarı artmaktadır.

Günümüz güç santrallerinde bir kademe ara ısıtmanın uygulanması, buhara ısı verilen ortalama sıcaklığı yükselttiği için çevrimin ısıl verimini yüzde %4 -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 kademedен 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.

(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:

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

$$2 \text{ Hali: } \begin{array}{l} P_2 = 15 \text{ MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}$$

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

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

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

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

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

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

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

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