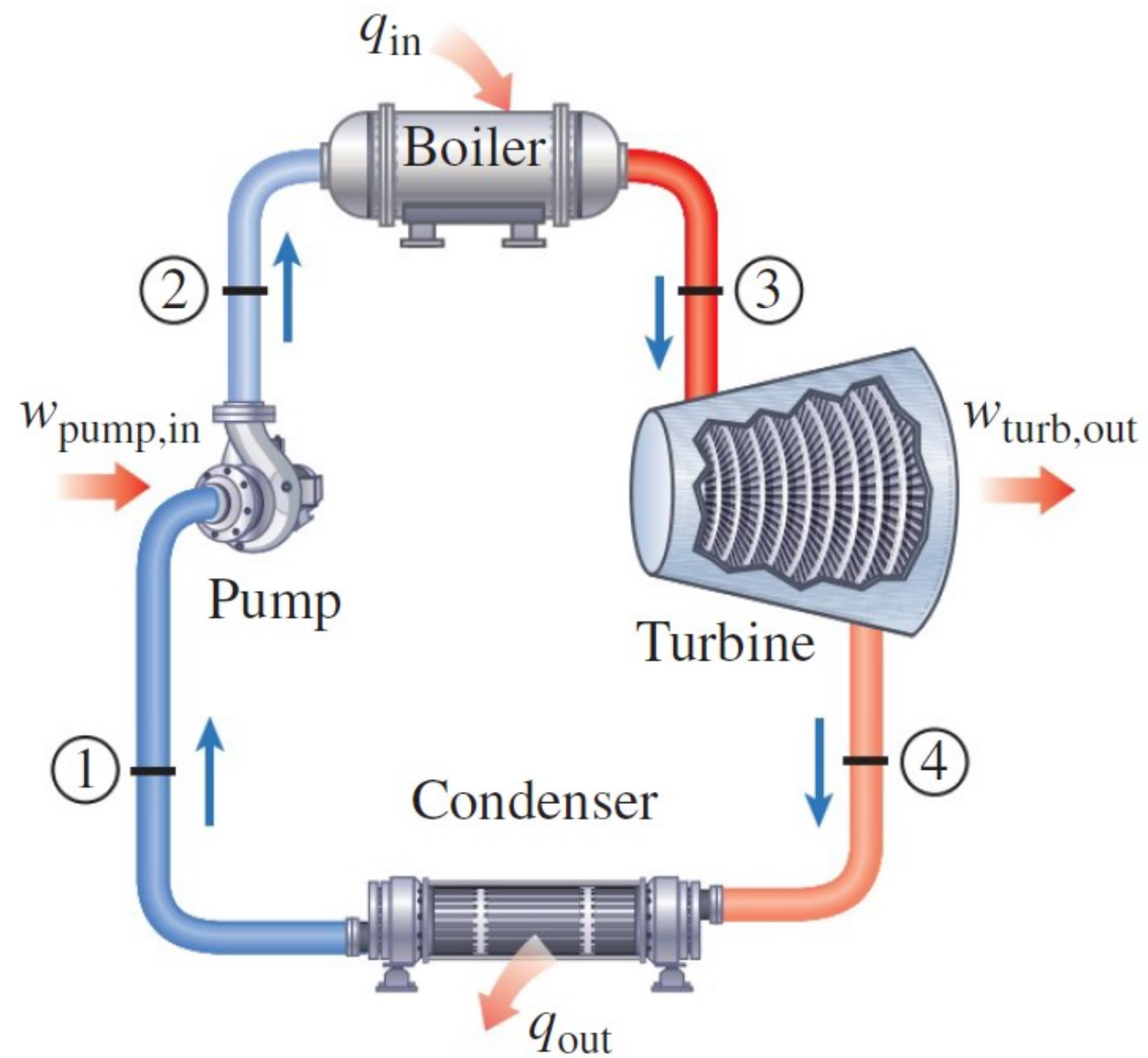


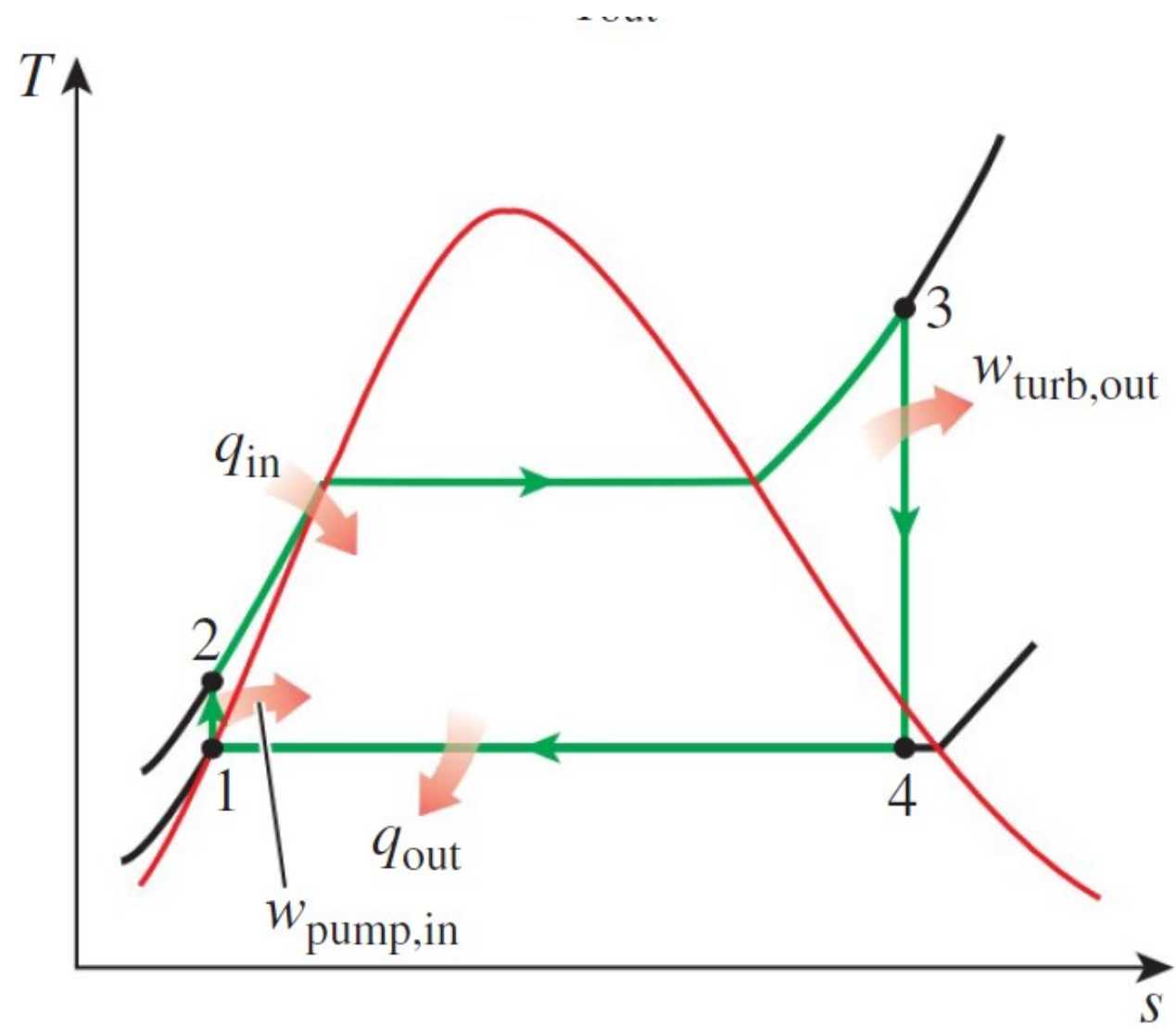
سیکل رانکین (Rankine Cycle)

سیکل رانکین سیکل ساده نیروگاه بخار است. فرایندهای این سیکل بشرح زیر است:

۱. فرآیند آدیاباتیکی بازگشت پذیر: در طی این فرآیند فشار سیال عامل با ورود به پمپ افزایش می یابد و فرایند به صورت آدیاباتیکی برگشت پذیر است، یعنی مقدار آنترופی در طی این تحول ثابت می ماند. (فرایند ۱ تا ۲)
۲. فرآیند جذب حرارت در فشار ثابت: طی این فرآیند که در بویلر فشار ثابت رخ می دهد سیال عامل با جذب گرما از بویلر از حالت مایع متراکم (مادون سرد) به حالت بخار مافوق گرم در می آید. (فرایند ۲ تا ۳)
۳. فرآیند انبساط آیزنتروپیک: طی این تحول که در توربین آدیاباتیکی انجام می شود فشار سیال عامل افت پیدا می کند. انرژی سیال عامل باعث چرخش پره های توربین می شود، با خروج از توربین سیال عامل به حالت دو فازی در می آید که در مواردی ممکن است بخار اشباع یا حتی بخار مافوق گرم هم باشد. (فرایند ۳ تا ۴)
۴. فرآیند دفع حرارت: آخرین فرآیند در سیکل رانکین فرآیند دفع حرارت در فشار ثابت می باشد که این فرآیند در کندانسور (چگالنده) رخ می دهد. در طی این فرآیند سیال عامل به حالت اولیه خود در شروع سیکل یعنی مایع اشباع در می آید. (فرایند ۴ تا ۱)



$T \blacktriangle$



روابط مربوط به سیکل رانکین (تجزیه و تحلیل سیکل رانکین)

منظور از تجزیه و تحلیل یک سیکل، تعیین کار و انتقال حرارت در بخشهای مختلف و نهایتاً محاسبه راندمان آن است که برای این منظور باید انتالپی در نقاط مختلف آن را بدست آورد.

نقطه ۱: مایع اشباع

$$v_1 = v_f|_{P_1 \text{ or } T_1} \quad h_1 = h_f|_{P_1 \text{ or } T_1}$$

نقطه ۲: مایع متراکم

$$h_2 = h_1 + v_1(P_2 - P_1)$$

نقطه ۳: بخار مافوق گرم

با داشتن دو خاصیت دما و فشار و با مراجعه به جدول مافوق گرم انتالپی و انتروپی خوانده می شود.

$$T_3 \text{ and } P_3 \rightarrow h_3 \text{ and } s_3$$

نقطه ۴: دوفازی (در مواردی خاص ممکن است سیال عامل در فاز بخار اشباع یا مافوق گرم هم باشد).

$$s_4 = s_3$$

$$P_4 = P_1$$

ابتدا کیفیت در نقطه ۴ از رابطه زیر بدست می آید:

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f|_{P_4}}{s_{fg}|_{P_4}}$$

نقطه ۴ در حالت دوفازی است اگر $x_4 < 1$ و در حالت بخار اشباع است اگر $x_4 = 1$ و اگر $x_4 > 1$ در حالت بخار مافوق گرم است.

اگر سیال عامل در حالت دوفازی یا بخار اشباع باشد از رابطه زیر انتالپی بدست می آید:

$$h_4 = h_f|_{P_4} + x_4 h_{fg}|_{P_4}$$

و اگر در حالت بخار مافوق گرم باشد با دو خاصیت انتروپی و فشار و به کمک جدول بخار مافوق گرم انتالپی خوانده می شود.

نرخ کار پمپ:

$$\dot{W}_p = \dot{m}v(P_2 - P_1)$$

نرخ انتقال حرارت در بویلر:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$h_2 = h_1 + w_p =$$

نرخ کار توربین:

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

نرخ انتقال گرما از کندانسور:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_4 - h_1)$$

ب - ب

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

راندمان:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{\dot{m}(h_4 - h_1)}{\dot{m}(h_3 - h_2)}$$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}}$$

راندمان سیکل رانکین بر خلاف سیکل کارنو به نوع سیال عامل بستگی دارد زیرا انتالپی به نوع سیال بستگی دارد.

مثال ١

Determine the efficiency of a Rankine cycle using steam as the working fluid in which the condenser pressure is 10 kPa. The boiler pressure is 2 MPa. The steam leaves the boiler as saturated vapor.

In solving Rankine-cycle problems, we let w_p denote the work into the pump per kilogram of fluid flowing and q_L denote the heat rejected from the working fluid per kilogram of fluid flowing.

To solve this problem we consider, in succession, a control surface around the pump, the boiler, the turbine, and the condenser. For each, the thermodynamic model is the steam tables, and the process is steady state with negligible changes in kinetic and potential energies. First, consider the pump:

Control volume: Pump.

Inlet state: P_1 known, saturated liquid; state fixed.

Exit state: P_2 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_p = h_2 - h_1$$

$$\text{Entropy Eq.: } s_2 = s_1$$

and so

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP$$

Solution

Assuming the liquid to be incompressible, we have

$$w_p = v(P_2 - P_1) = (0.00101)(2000 - 10) = 2.0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_p = 191.8 + 2.0 = 193.8 \text{ kJ/kg}$$

Now consider the boiler:

Control volume: Boiler.

Inlet state: P_2, h_2 known; state fixed.

Exit state: P_3 known, saturated vapor; state fixed.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } q_H = h_3 - h_2$$

Solution

Substituting, we obtain

$$q_H = h_3 - h_2 = 2799.5 - 193.8 = 2605.7 \text{ kJ/kg}$$

Turning to the turbine next, we have:

Control volume: Turbine.

Inlet state: State 3 known (above).

Exit state: P_4 known.

Turning to the turbine next, we have:

Control volume: Turbine.

Inlet state: State 3 known (above).

Exit state: P_4 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_t = h_3 - h_4$$

$$\text{Entropy Eq.: } s_3 = s_4$$

Solution

We can determine the quality at state 4 as follows:

$$s_3 = s_4 = 6.3409 = 0.6493 + x_4 7.5009, \quad x_4 = 0.7588$$

$$h_4 = 191.8 + 0.7588(2392.8) = 2007.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_t = 2799.5 - 2007.5 = 792.0 \text{ kJ/kg}$$

Finally, we consider the condenser.

Control volume: Condenser.

Inlet state: State 4 known (as given).

Exit state: State 1 known (as given).

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } q_L = h_4 - h_1$$

Solution

Substituting, we obtain

$$q_L = h_4 - h_1 = 2007.5 - 191.8 = 1815.7 \text{ kJ/kg}$$

We can now calculate the thermal efficiency:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = \frac{w_t - w_p}{q_H} = \frac{792.0 - 2.0}{2605.7} = 30.3\%$$

We could also write an expression for thermal efficiency in terms of properties at various points in the cycle:

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_3 - h_2} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \\ &= \frac{2605.7 - 1815.7}{2605.7} = \frac{792.0 - 2.0}{2605.7} = 30.3\%\end{aligned}$$

تمرین

در یک سیکل رانکین که با بخار آب کار می کند فشار چگالنده 10kPa و دما و فشار خروجی از بویلر به ترتیب 300C و 2MPa است. راندمان سیکل را حساب کنید.

روشهای افزایش راندمان سیکل رانکین

برای افزایش راندمان سیکل رانکین روشهای متعددی وجود دارد که این روشها را در ادامه بررسی خواهیم کرد. با توجه به اینکه $\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H}$ است، لذا هر عملی که بتوان انجام داد تا در مقدار حرارت جذب شده ثابت، کار تولیدی افزایش یابد یا نسبت افزایش کار تولیدی به افزایش حرارت جذب شده بیشتر از نسبت کار تولیدی به حرارت جذب شده اولیه باشد منجر به افزایش راندمان سیکل خواهد شد.

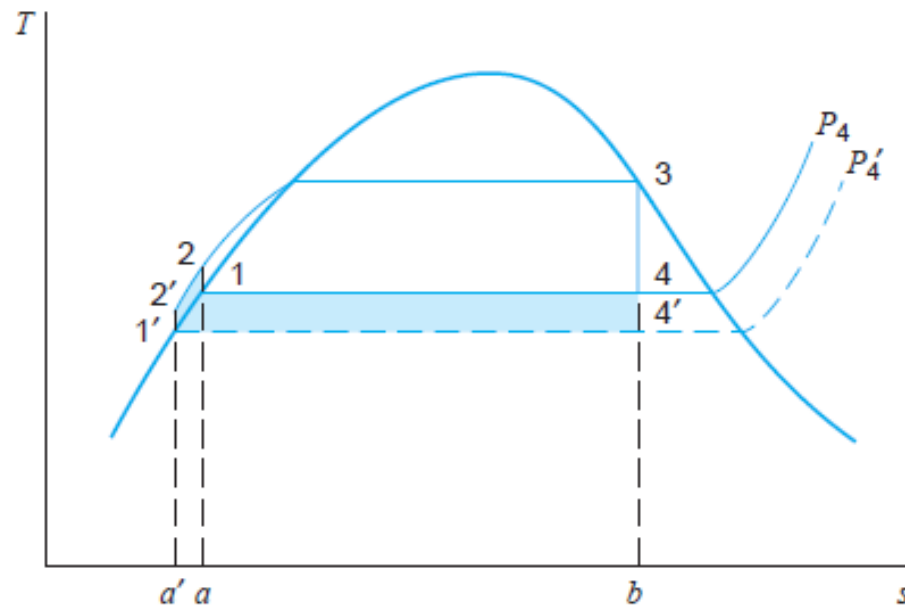


FIGURE 11.4 Effect of exhaust pressure on Rankine-cycle efficiency.

با کاهش فشار کندانسور مطابق شکل از (1-4) به (1'-4') مقدار کار خالص سیکل به اندازه سطح هاشورخورده (1-4-4'-1'-2'-2-a-a') افزوده می شود، اگرچه به اندازه سطح $a'-2'-2-a-a'$ مقدار حرارت جذب شده سیکل افزایش می یابد ولی افزایش مقدار کار بیش از افزایش انتقال حرارت است در نتیجه راندمان سیکل اندکی افزایش می یابد.

این روش معایبی دارد که عبارتند از:

۱. با کاهش فشار پایین سیکل نقطه 4 به نقطه 4' تبدیل می شود و چون نقطه 4' فاصله بیشتری از خط بخار اشباع نسبت به نقطه 4 دارد لذا کیفیت کاهش می یابد، کاهش کیفیت به معنای افزایش رطوبت در طبقات پایین توربین است و می دانیم که رطوبت باعث خوردگی زود هنگام پره ها می شود.

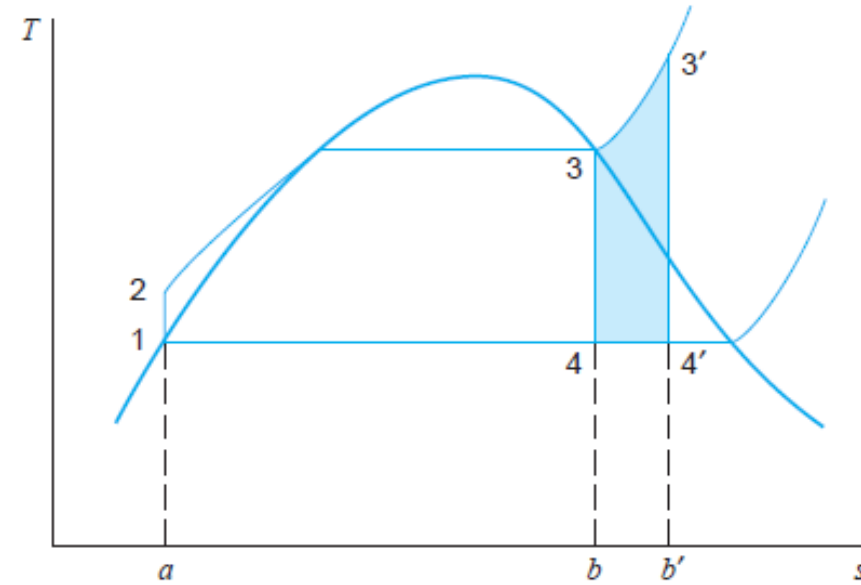
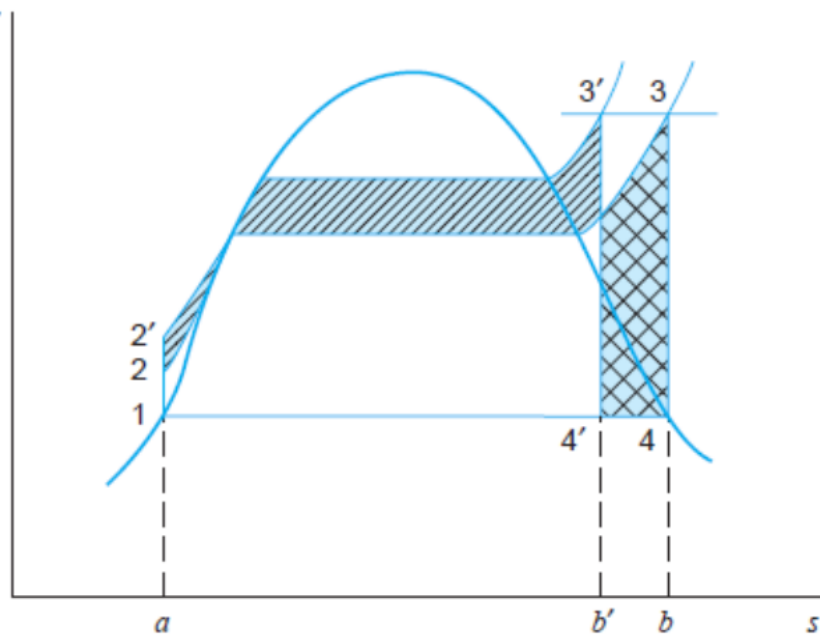


FIGURE 11.5 Effect of superheating on Rankine-cycle efficiency.

افزایش دمای پیشینه سیکل

با افزایش دمای پیشینه سیکل (دمای خروجی بویلر) مطابق شکل به اندازه سطح $(3-3'-4'-4-3)$ بر مقدار کار و به اندازه سطح $(3-3'-b'-b-3)$ بر مقدار حرارت منتقل شده افزوده می شود. چون نسبت سطح اول به سطح دوم از نسبت کار خالص به حرارت منتقل شده در بقیه سیکل بیشتر است لذا راندمان افزایش خواهد یافت. همچنین مطابق شکل کیفیت بخار خروجی از توربین زیاد می شود و این یکی از مزایای این روش است. اما به دلیل محدودیت های متالورژیکی نمی توان دما را از حد معینی افزایش داد زیرا باعث اعوجاج و تغییر شکل در پره ها می شود. در حال حاضر بیشترین دمایی که پره های توربین بخار قادر به تحمل آن هستند 620°C می باشد که البته برای اطمینان باید تلاش کرد دما از 590°C بیشتر نشود.

افزایش فشار بالای سیکل



یکی دیگر از روش های افزایش راندمان سیکل رانکین افزایش فشار بالای سیکل (فشاربویلر) است. برای این منظور می توان از یک پمپ قویتر استفاده کرد. مطابق شکل مشاهده می شود که حرارت دفع شده به اندازه سطح $(b' - 4' - 4 - b - b')$ کاهش می یابد. کار خالص به اندازه سطح هاشورخورده بالایی افزایش یافته و به اندازه سطح هاشورخورده سمت راست، کاهش می یابد که این کاهش بدلیل استفاده از یک پمپ قویتر است چون پمپ مصرف کننده انرژی است. چون این دو سطح تقریباً با هم برابرند، بنابراین کار خالص تقریباً ثابت می ماند ولی حرارت دفع شده کاهش یافته است، لذا کارایی سیکل افزایش می یابد.

همچنین این روش باعث کاهش کیفیت و در نتیجه افزایش رطوبت در طبقات تحتانی توربین می شود.

مثال ٢

In a Rankine cycle, steam leaves the boiler and enters the turbine at 4 MPa and 400°C. The condenser pressure is 10 kPa. Determine the cycle efficiency.

To determine the cycle efficiency, we must calculate the turbine work, the pump work, and the heat transfer to the steam in the boiler. We do this by considering a control surface around each of these components in turn. In each case the thermodynamic model is the steam tables, and the process is steady state with negligible changes in kinetic and potential energies.

Control volume: Pump.

Inlet state: P_1 known, saturated liquid; state fixed.

Exit state: P_2 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_p = h_2 - h_1$$

$$\text{Entropy Eq.: } s_2 = s_1$$

Since $s_2 = s_1$,

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP = v(P_2 - P_1)$$

Solution

Substituting, we obtain

$$w_p = v(P_2 - P_1) = (0.001 \, 01)(4000 - 10) = 4.0 \, \text{kJ/kg}$$

$$h_1 = 191.8 \, \text{kJ/kg}$$

$$h_2 = 191.8 + 4.0 = 195.8 \, \text{kJ/kg}$$

For the turbine we have:

Control volume: Turbine.

Inlet state: P_3, T_3 known; state fixed.

Exit state: P_4 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_t = h_3 - h_4$$

$$\text{Entropy Eq.: } s_4 = s_3$$

Solution

Upon substitution we get

$$h_3 = 3213.6 \text{ kJ/kg}, \quad s_3 = 6.7690 \text{ kJ/kg K}$$

$$s_3 = s_4 = 6.7690 = 0.6493 + x_4 7.5009, \quad x_4 = 0.8159$$

$$h_4 = 191.8 + 0.8159(2392.8) = 2144.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 3213.6 - 2144.1 = 1069.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_t - w_p = 1069.5 - 4.0 = 1065.5 \text{ kJ/kg}$$

Finally, for the boiler we have:

Control volume: Boiler.

Inlet state: P_2, h_2 known; state fixed.

Exit state: State 3 fixed (as given).

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } q_H = h_3 - h_2$$

Solution

Substituting gives

$$q_H = h_3 - h_2 = 3213.6 - 195.8 = 3017.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{1065.5}{3017.8} = 35.3\%$$

The net work could also be determined by calculating the heat rejected in the condenser, q_L , and noting, from the first law, that the net work for the cycle is equal to the net heat

transfer. Considering a control surface around the condenser, we have

$$q_L = h_4 - h_1 = 2144.1 - 191.8 = 1952.3 \text{ kJ/kg}$$

Therefore,

$$w_{\text{net}} = q_H - q_L = 3017.8 - 1952.3 = 1065.5 \text{ kJ/kg}$$