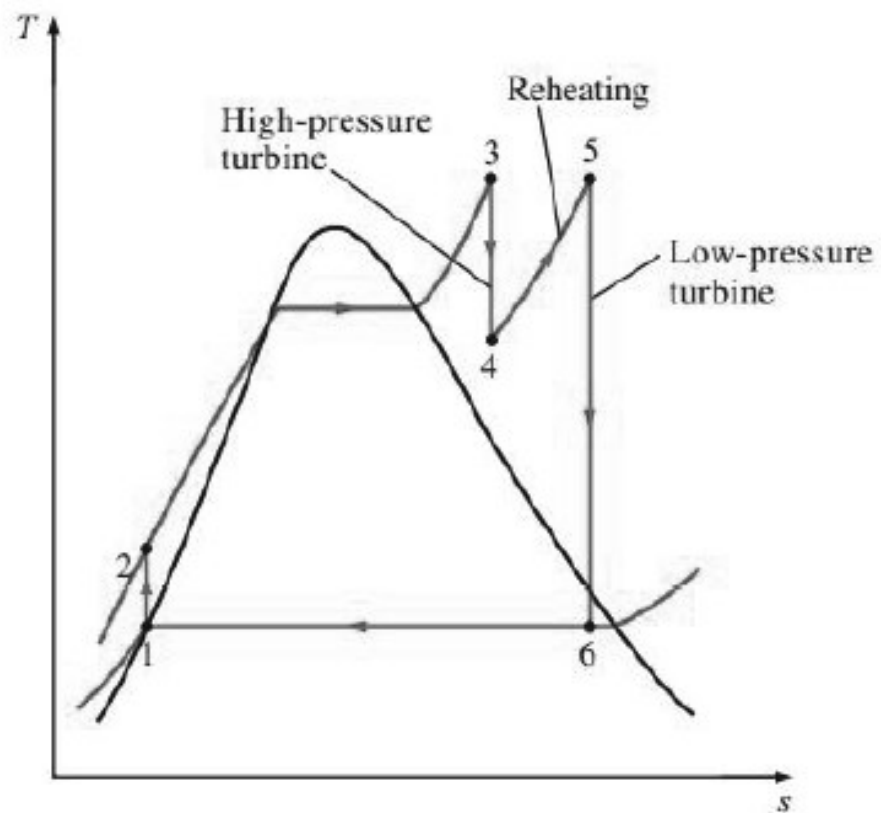
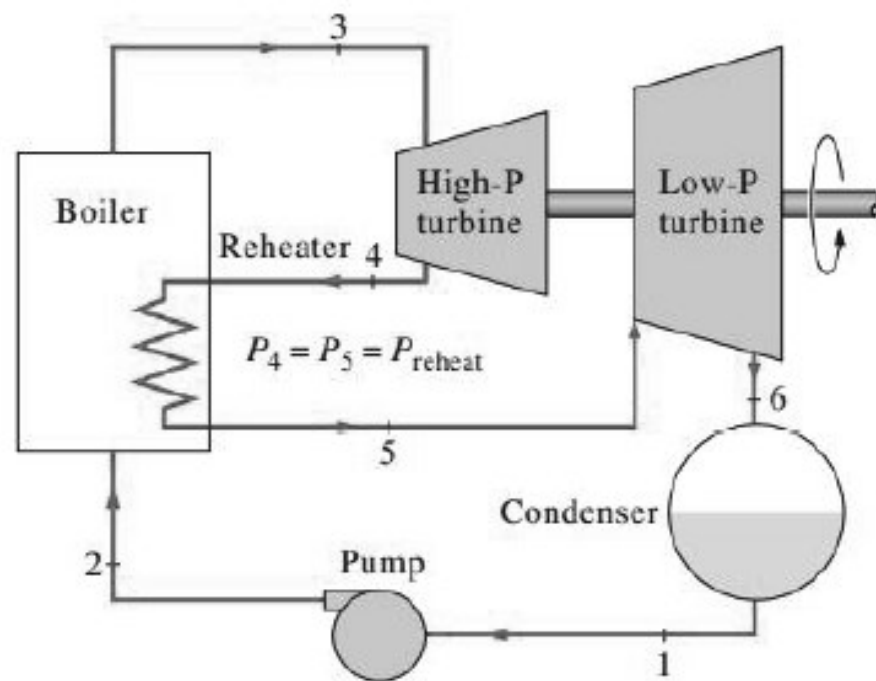


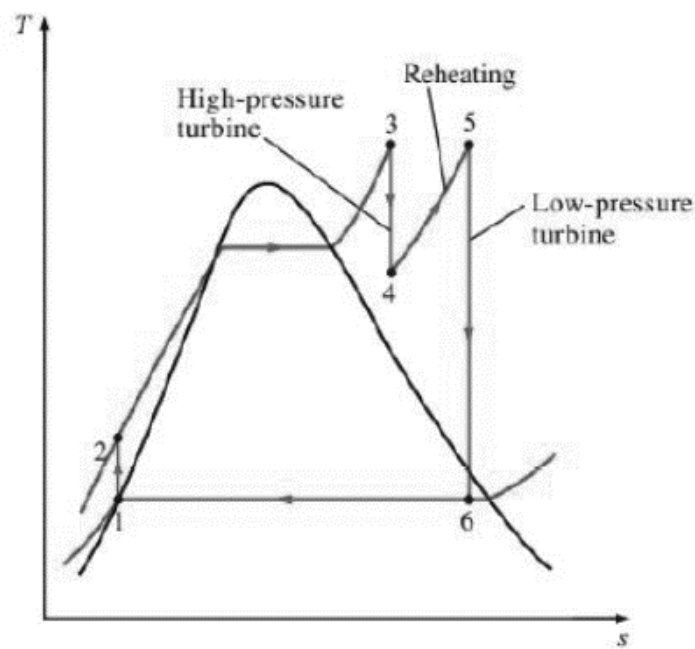
سیکل گرمایش مجدد (Reheat Cycle)

یکی دیگر از روشهای افزایش راندمان سیکل رانکین که یک روش عملی است و در نیروگاه ها از آن استفاده می شود دوباره گرم کردن بخار آب است که اصطلاحاً گرمایش مجدد نام دارد. اساس کار این روش بر این اصل استوار است که چنانچه بتوان دمای بخار آب را حین کار گرفتن بالا نگه داشت راندمان افزایش می یابد. در این سیکل، بخار آب پس از خروج از بویلر وارد توربین فشار بالا شده و پس از گرفتن کار از آن و انبساط تا فشار معینی مجدداً به سمت بویلر هدایت شده و دمای آن افزایش می یابد در این مرحله بخار وارد توربین فشار پایین می شود و تا فشار پایین سیکل انبساط می یابد در نهایت بخار وارد کندانسور شده و با تبدیل به مایع اشباع سیکل تکمیل می گردد. در حقیقت این سیکل در سه فشار مختلف کار می کند. همچنین کیفیت با این روش افزایش می یابد.



- گرچه گرمایش مجدد بازده چرخه را افزایش می دهد ولی هدف اصلی بکارگیری آن کنترل رطوبت خروجی توربین کم فشار است.

در نیروگاه ها غالباً تا دوبار از این روش استفاده می شود و بیشتر از آن مقرون به صرفه نمی باشد، مقدار افزایش راندمان سیکل در دفعه دوم نصف دفعه اول است. لازم به ذکر است چنانچه بتوان فلزی را یافت کرد که قادر به تحمل دماهای بالا باشد استفاده از روش افزایش دمای بیشینه سیکل بر این روش ترجیح داده می شود زیرا افزایش کارایی بر اثر گرمایش مجدد بسیار کم است. با توجه به نیاز به یک شبکه لوله کشی پیچیده و همچنین استفاده از توربین دو طبقه این روش هزینه بالایی می طلبد.



تجزیه و تحلیل سیکل گرمایش مجدد

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

$$s_4 = s_3$$

$$P_4 = P_5$$

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

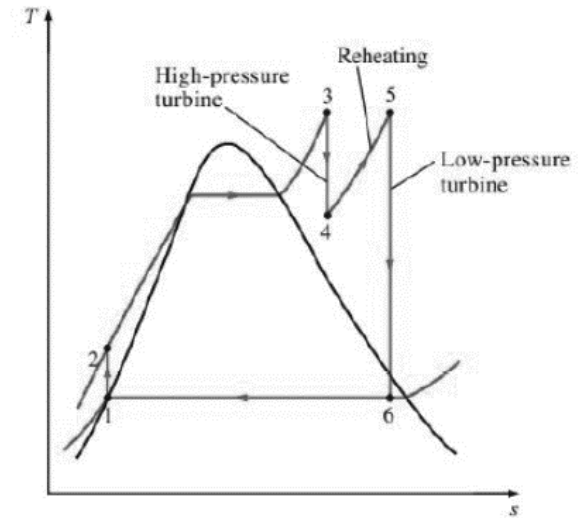
$$x_4 = \frac{s_4 - s_f|_{P_4}}{s_{fg}|_{P_4}}$$

نقطه ۴ در حالت دو فازی 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 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.



نقطه ۵: بخار مافوق گرم

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

$$T_5 \text{ and } P_5 \rightarrow h_5 \text{ and } s_5$$

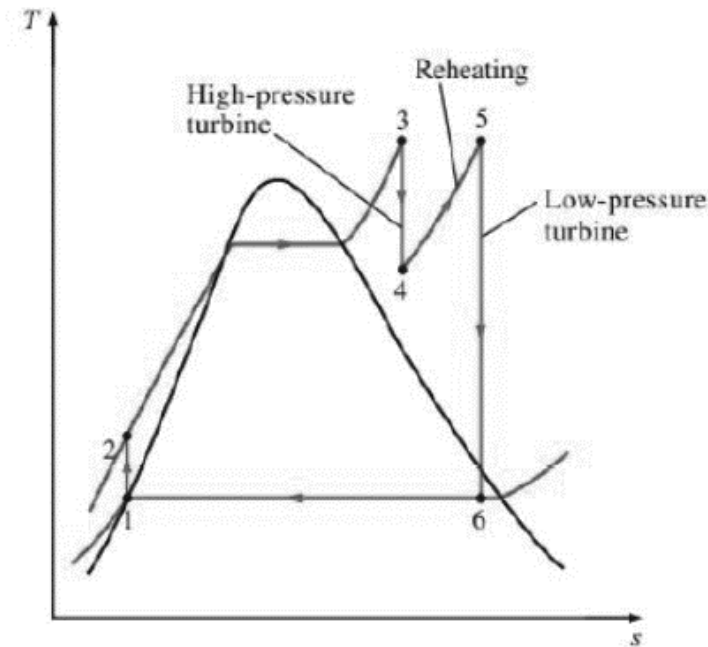
نقطه ۶: دوفازی (در مواردی خاص ممکن است سیال عامل در فاز بخار اشباع یا مافوق گرم هم باشد).

$$s_6 = s_5$$

$$P_6 = P_1$$

ابتدا کیفیت در نقطه ۶ از رابطه زیر بدست می آید:

$$x_6 = \frac{s_6 - s_f|_{P_6}}{s_{fg}|_{P_6}}$$

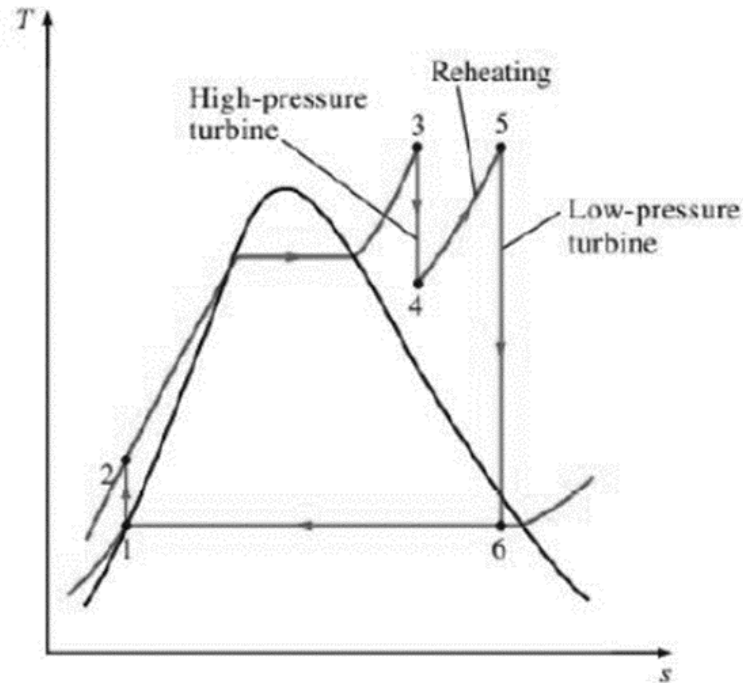


نقطه ۶ در حالت دو فازی است اگر $x_6 < 1$ و در حالت بخار اشباع است اگر $x_6 = 1$ و اگر $x_6 > 1$ در حالت بخار ما فوق گرم است.

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

$$h_6 = h_f|_{P_6} + x_6 h_{fg}|_{P_6}$$

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:

$$w_p = v(P_2 - P_1)$$

$$h_2 = h_1 + w_p$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

نرخ انتقال حرارت در بویلر:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}[(h_3 + h_5) - (h_2 + h_4)]$$

نرخ کار توربین:

$$\dot{W}_t = \dot{m}[(h_3 + h_5) - (h_4 + h_6)]$$

نرخ انتقال گرما از کندانسور:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_6 - h_1)$$

راندمان:

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

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{\dot{m}(h_6 - h_1)}{\dot{m}[(h_3 + h_5) - (h_2 + h_4)]} \Rightarrow$$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{h_6 - h_1}{(h_3 + h_5) - (h_2 + h_4)}}$$

مثال

• یک چرخه گرمایش مجدد در نظر بگیرید. بخار آب خارج شده از بویلر در شرایط ۴ مگاپاسکال و دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس وارد توربین پرفشار می شود. بخار پس از انبساط تا فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال از توربین خارج شده و به منظور بازگرمایش بویلر بازگردانده شده و تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس گرم می شود. این بخار سپس در توربین کم فشار تا فشار ۱۰ کیلوپاسکال منبسط شده و وارد چگالنده می شود. بازده چرخه را حساب کنید

حل:

For the high-pressure turbine,

Control volume: High-pressure turbine.

Inlet state: P_3 , T_3 known; state fixed.

Exit state: P_4 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_{h-p} = h_3 - h_4$$

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

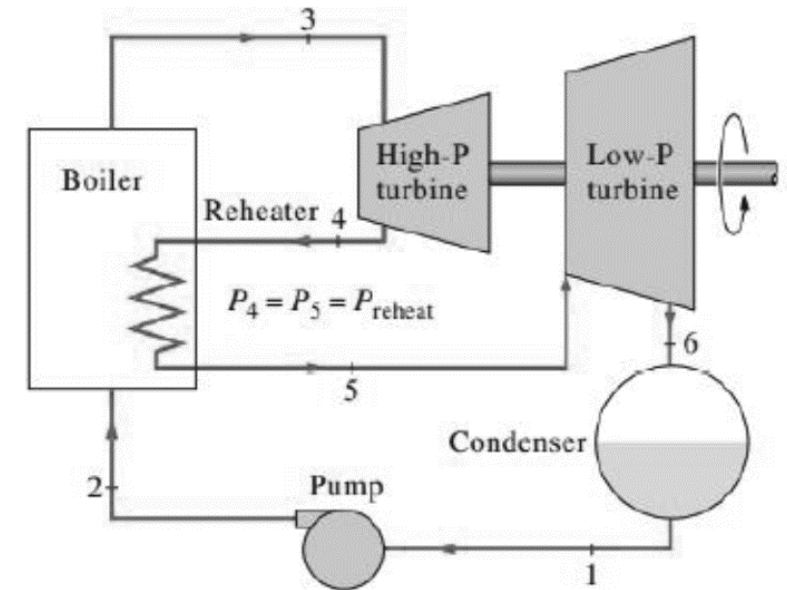
Solution

Substituting,

$$h_3 = 3213.6, \quad s_3 = 6.7690$$

$$s_4 = s_3 = 6.7690 = 1.7766 + x_4 5.1193, \quad x_4 = 0.9752$$

$$h_4 = 604.7 + 0.9752(2133.8) = 2685.6$$



For the low-pressure turbine,

Control volume: Low-pressure turbine.

Inlet state: P_5 , T_5 known; state fixed.

Exit state: P_6 known.

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } w_{l-p} = h_5 - h_6$$

$$\text{Entropy Eq.: } s_5 = s_6$$

Solution

Upon substituting,

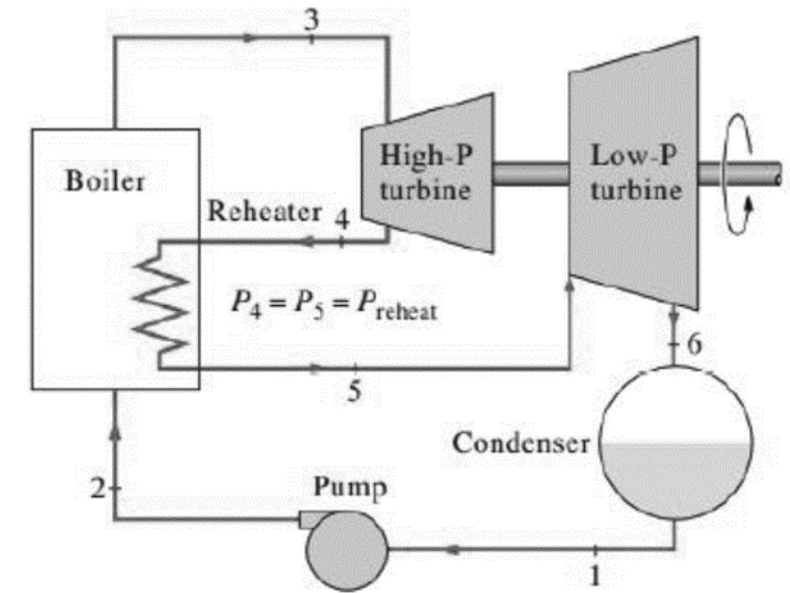
$$h_5 = 3273.4 \quad s_5 = 7.8985$$

$$s_6 = s_5 = 7.8985 = 0.6493 + x_6 7.5009, \quad x_6 = 0.9664$$

$$h_6 = 191.8 + 0.9664(2392.8) = 2504.3$$

For the overall turbine, the total work output w_t is the sum of w_{h-p} and w_{l-p} , so that

$$\begin{aligned} w_t &= (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \\ &= (3213.6 - 2685.6) + (3273.4 - 2504.3) \\ &= 1297.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



For the pump,

Control volume: Pump.

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

Exit state: P_2 known.

Analysis

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

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

Since $s_2 = s_1$,

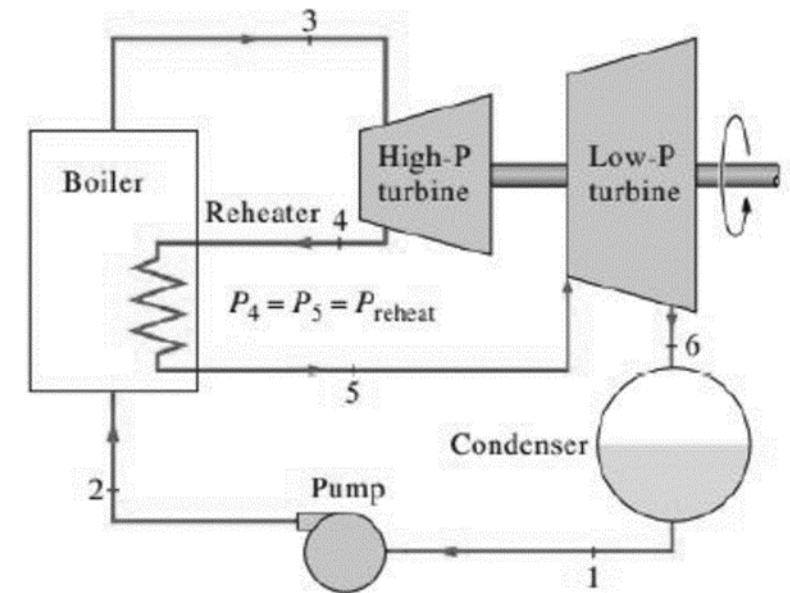
$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP = v(P_2 - P_1)$$

Solution

Substituting,

$$w_p = v(P_2 - P_1) = (0.00101)(4000 - 10) = 4.0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 191.8 + 4.0 = 195.8$$



Finally, for the boiler

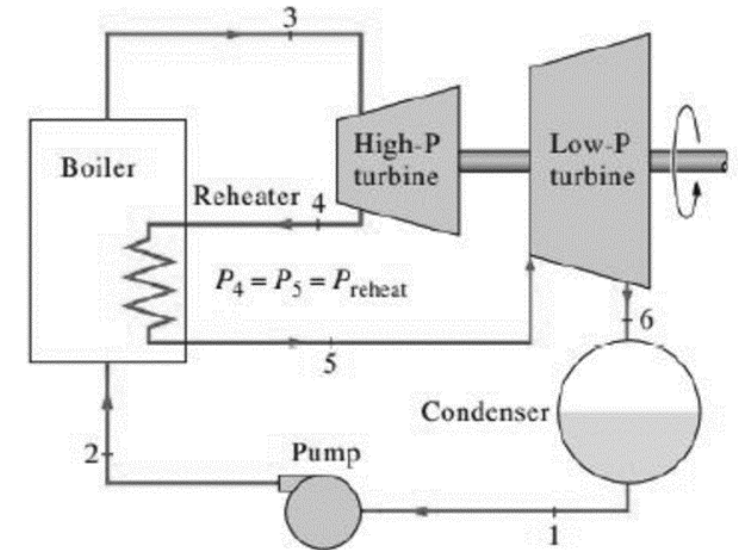
Control volume: Boiler.

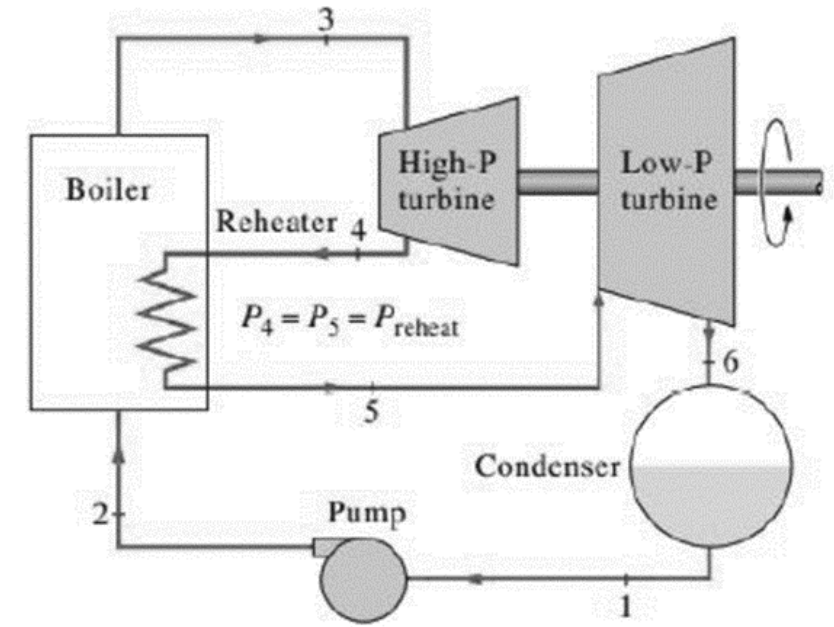
Inlet states: States 2 and 4 both known (above).

Exit states: States 3 and 5 both known (as given).

Analysis

$$\text{Energy Eq.: } q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$





Solution

Substituting,

$$\begin{aligned}
 q_H &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \\
 &= (3213.6 - 195.8) + (3273.4 - 2685.6) = 3605.6 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Therefore,

$$W_{\text{net}} = W_t - W_p = 1297.1 - 4.0 = 1293.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_H} = \frac{1293.1}{3605.6} = 35.9\%$$

By comparing this example with Example 11.2, we find that through reheating the gain in efficiency is relatively small, but the moisture content of the vapor leaving the turbine is decreased from 18.4 to 3.4%.

تمرین

تمرین

یک سیکل گرمایش مجدد را در نظر بگیرید که در آن از بخار آب بعنوان سیال فعال استفاده شده است. بخار آب در 3.5MPa و 350C وارد توربین فشار بالا می شود و تا 0.8MPa انبساط می یابد. سپس این بخار تا 350C مجددا گرم می شود و در توربین فشار پایین تا فشار 10kPa منبسط می گردد. کارایی حرارتی سیکل و محتوی رطوبت را در خروج از توربین فشار پایین حساب کنید.

سیکل بازیاب (Regenerative Cycle)

بازیاب وسیله ای است که در قسمتی از سیکل، حرارت را جذب و آن را به بخش دیگری از سیکل انتقال می دهد. در حقیقت می توان گفت بازیاب نوعی مبدل حرارتی (Heat Exchanger) است. سه نوع بازیاب وجود دارد.

سیکل بازیاب ایدآل (Ideal Regenerative Cycle)

بازیاب ایدآل در حقیقت استفاده از توربین به عنوان یک مبدل حرارتی است. بدین ترتیب که سیال پس از خروج از پمپ وارد توربین می شود و چون داخل توربین بدلیل وجود بخار آب، گرم است لذا گرمای بخار را گرفته و در هنگامی که از توربین خارج می شود به حالت مایع اشباع در می آید، سپس سیال عامل وارد بویلر شده و در دمای ثابت به بخار اشباع تبدیل می شود. در ادامه سیال عامل وارد توربین می شود و در توربین پس از انجام کار بدلیل از دست دادن حرارت به خروجی پمپ، دچار کاهش شدید کیفیت شده و نهایتاً پس از عبور از کندانسور به حالت مایع اشباع در آمده و سیکل تکمیل می شود.

از لحاظ عملی توربین نمی تواند نقش یک مبدل حرارتی را بازی کند و از طرفی کاهش شدید کیفیت بخار خروجی از توربین استفاده از توربین بعنوان یک بازیاب را غیر ممکن می سازد.

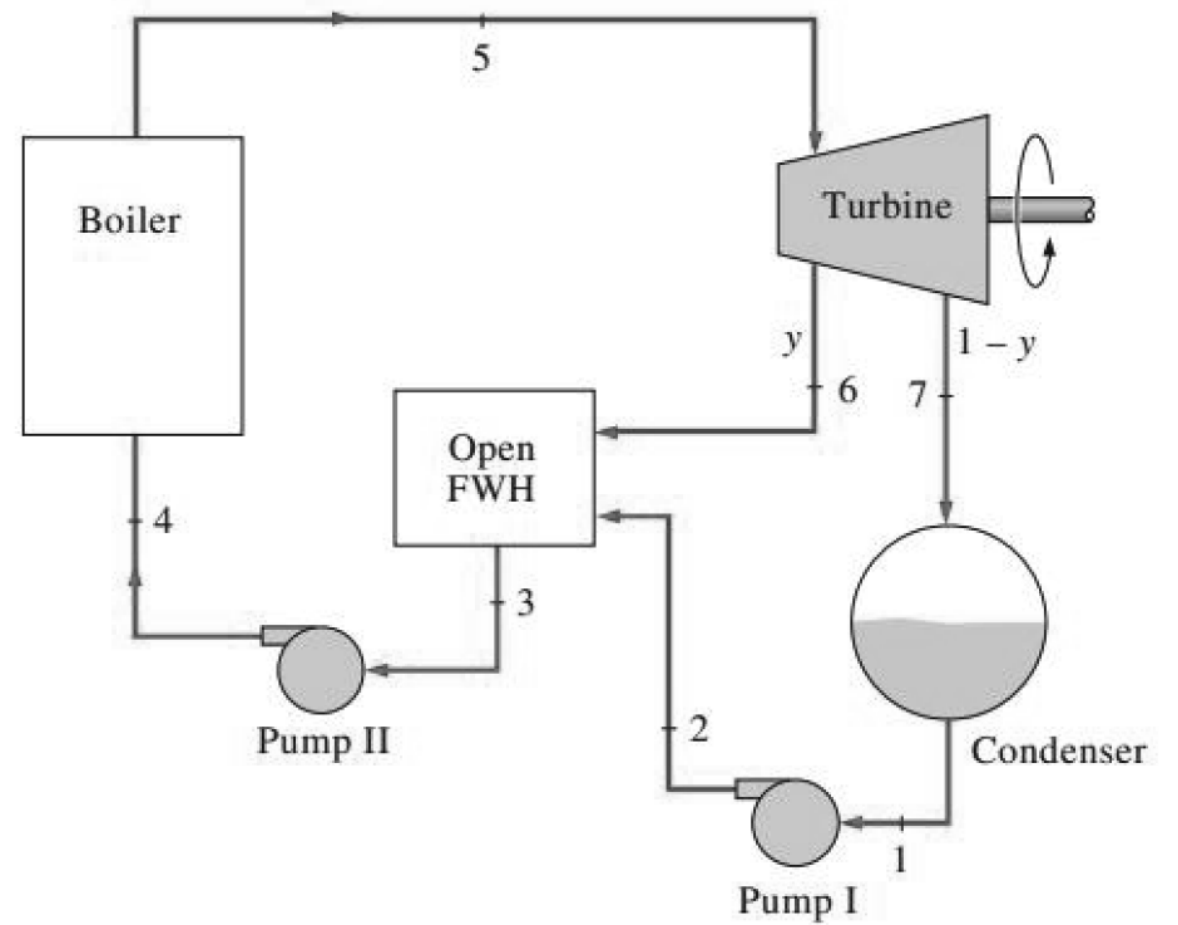
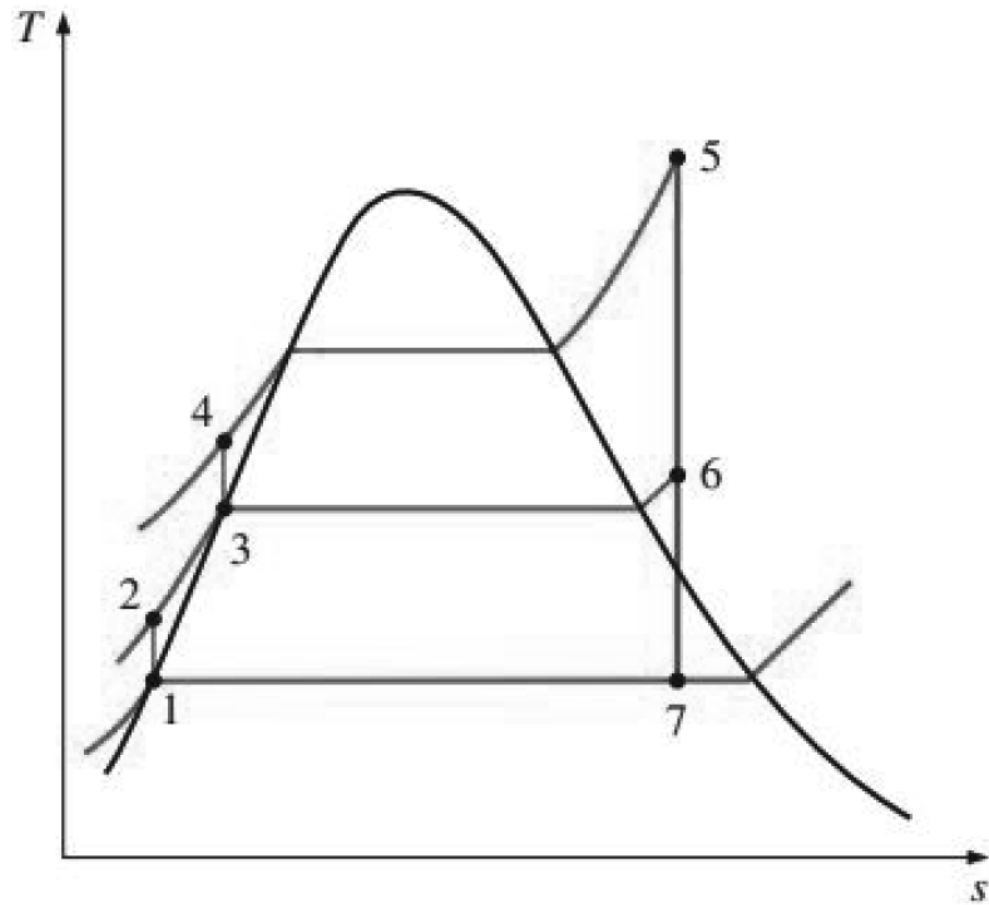
سیکل گرمایش باز آب تغذیه (Open Feedwater Heater Cycle)

اساس کار سیکل گرمایش باز آب تغذیه به شرح زیر است:

در این سیکل از یک گرمکن به منظور گرم نمودن آب قبل از ورود به بویلر استفاده می شود بخشی از بخار برداشت شده از توربین، گرمای لازم برای گرمکن را تامین می نماید. در ابتدا آب در فاز مایع اشباع وارد پمپ ۱ می شود و به

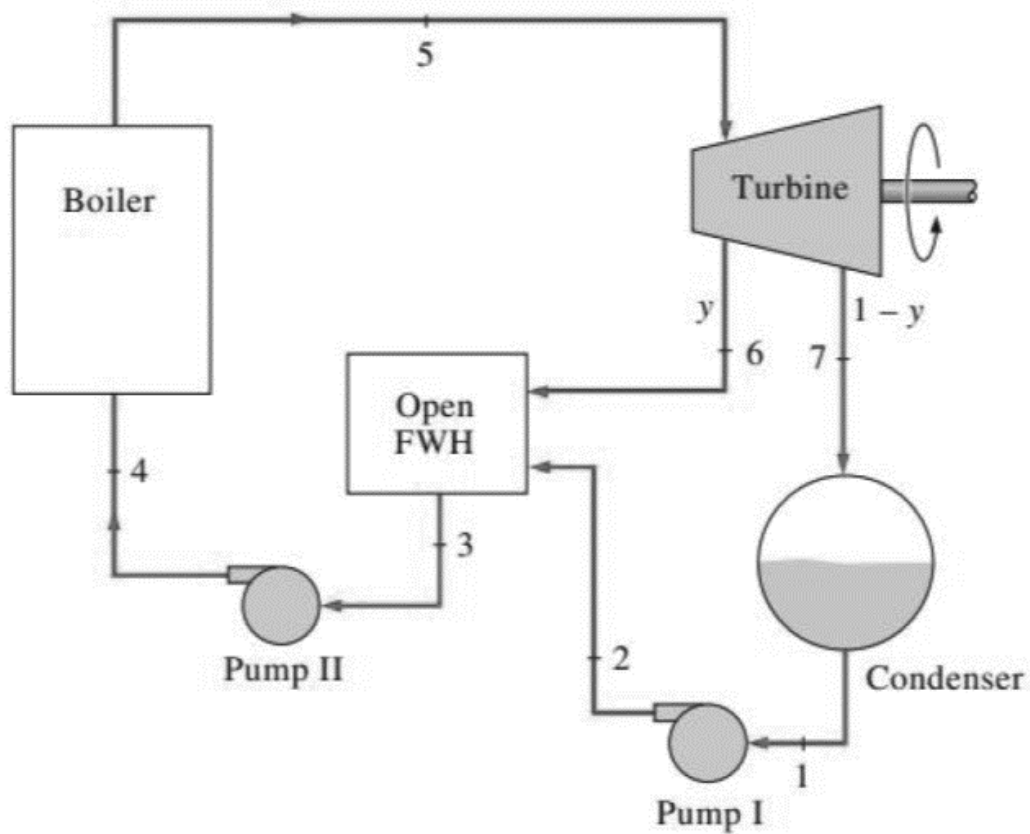
حالت مایع متراکم در می آید، سپس به منظور افزایش دما وارد گرم کن می شود. این گرمکن از نوع باز است یعنی تماس بین بخار برداشت شده از توربین و آب در گرمکن از نوع مستقیم است لذا مقدار انتقال حرارت یعنی حرارتی که بخار به آب می دهد و باعث گرم شدن آن می شود بالاست و این یکی از مزیت های این سیکل است. آب گرم می شود ولی برای ادامه حرکت به فشار نیاز دارد بنابراین از پمپ دیگری در مدار استفاده می شود. پمپ شماره ۲ آب را به حالت مایع متراکم قبل از ورود به بویلر در می آورد. این پمپ در حقیقت آب گرمتری را نسبت به پمپ قبلی پمپاژ می کند.

اکنون آب که گرم شده است وارد بویلر می شود و با جذب حرارت از یک منبع خارجی به بخار مافوق گرم تبدیل شده و وارد توربین می شود بخشی از بخار بعد از انجام کار به منظور تامین گرما در گرمکن از توربین برداشت می شود (γ) مقدار بخار برداشتی از توربین باید به اندازه ای باشد که آب خروجی از گرمکن را به حالت مایع اشباع در آورد. باقیمانده بخار (بخاری که از توربین برداشت نشده است) طی مسیر عادی حرکت خود وارد کندانسور میشود ($\dot{m} - \gamma$) و در کندانسور با از دست دادن حرارت تبدیل به مایع اشباع می شود سیکل گرمایش باز آب تغذیه تکمیل می شود.



شماتیکی از سیکل گرمایش باز آب تغذیه به همراه نمودار دما آنترپی که فرض شده است دبی جریان ۱ کیلوگرم بر ثانیه باشد.

تجزیه و تحلیل سیکل گرمایش باز آب تغذیه



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: مایع اشباع

$$P_2 = P_3 = P_6$$

$$v_3 = v_f|_{P_3 \text{ or } T_3}$$

$$h_3 = h_f|_{P_3 \text{ or } T_3}$$

نقطه ۴: مایع متراکم

$$P_4 = P_5$$

$$h_4 = h_3 + v_3 (P_4 - P_3)$$

نقطه ۵: بخار مافوق گرم

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

$$T_5 \text{ and } P_5 \rightarrow h_5 \text{ and } s_5$$

نقطه ۶: بخار مافوق گرم (در مواردی خاص ممکن است سیال عامل در فاز بخار اشباع یا دوفازی هم باشد).

$$s_6 = s_5$$

$$P_6 = P_2 = P_3$$

ابتدا کیفیت در نقطه ۶ از رابطه زیر بدست می آید:

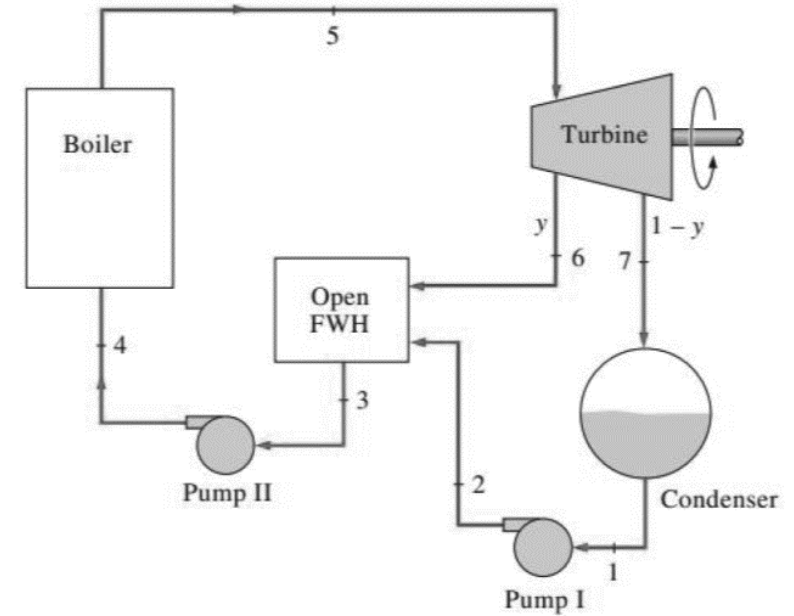
$$x_6 = \frac{s_6 - s_f|_{P_6}}{s_{fg}|_{P_6}}$$

نقطه ۶ در حالت دو فازی است اگر $x_6 < 1$ و در حالت بخار اشباع است اگر $x_6 = 1$ و اگر $x_6 > 1$ در حالت بخار مافوق گرم است.

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

$$h_6 = h_f|_{P_6} + x_6 h_{fg}|_{P_6}$$

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



در این مرحله با نوشتن معادله بقای انرژی برای گرمکن مقدار بخار برداشت شده از توربین (y) بدست می آید:

$$yh_6 + (\dot{m} - y)h_2 = \dot{m}h_3$$

نقطه ۷: دوفازی (در مواردی خاص ممکن است سیال عامل در فاز بخار اشباع یا ما فوق گرم هم باشد).

$$s_7 = s_5$$

$$P_7 = P_1$$

ابتدا کیفیت در نقطه ۷ از رابطه زیر بدست می آید:

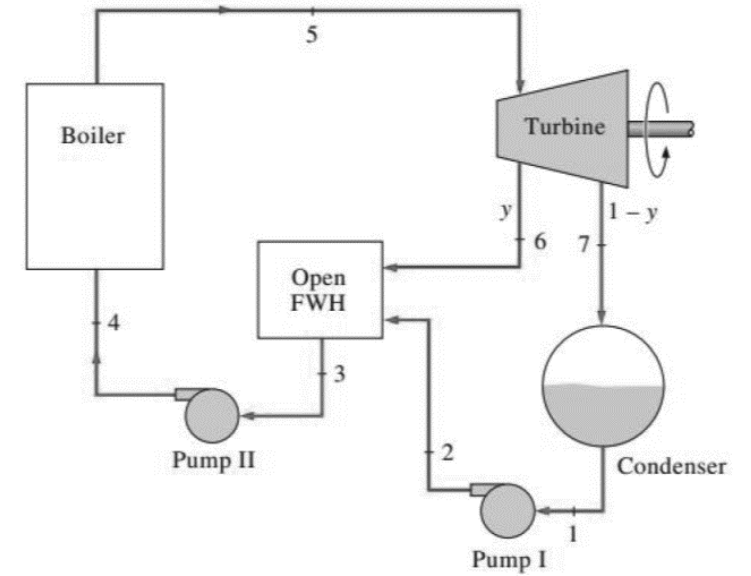
$$x_7 = \frac{s_7 - s_f|_{P_7}}{s_{fg}|_{P_7}}$$

نقطه ۷ در حالت دو فازی است اگر $x_7 < 1$ و در حالت بخار اشباع است اگر $x_7 = 1$ و اگر $x_7 > 1$ در حالت بخار ما فوق گرم است.

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

$$h_7 = h_f|_{P_7} + x_7 h_{fg}|_{P_7}$$

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



نرخ کار پمپ ۱:

$$\dot{W}_{P1} = (\dot{m} - y)(h_2 - h_1)$$

نرخ کار پمپ ۲:

$$\dot{W}_{P2} = \dot{m}(h_4 - h_3)$$

نرخ انتقال حرارت در بویلر:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_5 - h_4)$$

نرخ کارتوربین:

$$\dot{W}_t = \dot{m}h_5 - yh_6 - (\dot{m} - y)h_7$$

نرخ انتقال گرما از کندانسور:

$$\dot{Q}_L = (\dot{m} - y)(h_7 - h_1)$$

راندمان:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{W}_t - (\dot{W}_{P1} + \dot{W}_{P2})}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{(\dot{m} - y)(h_7 - h_1)}{\dot{m}(h_5 - h_4)}$$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{(\dot{m} - y)(h_7 - h_1)}{\dot{m}(h_5 - h_4)}}$$

مثال (چرخه بازیاب با استفاده از گرمکن آب تغذیه باز)

- در یک چرخه بازیابی بخار آب در شرایط ۴ مگاپاسکال و ۴۰۰ درجه سلسیوس از بویلر خارج و وارد توربین می شود. بعد از آنکه بخار تا فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال انبساط یافت مقداری از بخار برای استفاده در گرمکن آب تغذیه باز برداشت می شود. فشار گرمکن آب تغذیه ۴۰۰ کیلوپاسکال بوده و آب بصورت مایع اشباع در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال از گرمکن خارج می شود. بخار باقی مانده تا فشار ۱۰ کیلوپاسکال منبسط شده و وارد چگالنده می شود. بازده چرخه را حساب نمایید