

ME 331
YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİ

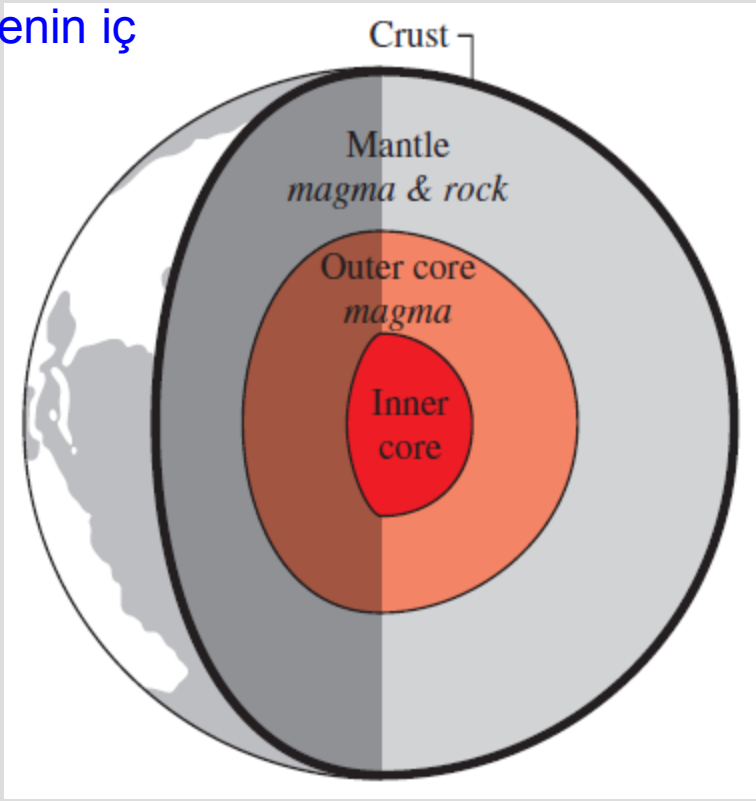
GEOHERMAL ENERGY

Ceyhun Yılmaz
Afyon Kocatepe Üniversitesi

INTRODUCTION

- Jeotermal enerji yer kabuğunun içindeki termal enerjidir.
- Jeotermal enerji yenilenebilir bir enerji kaynağıdır, çünkü ısı, yerküre ısısı yağışla geri dönüşümlü suya sürekli olarak aktarılır veya kullanımdan sonra tekrar yer altına geri basılır.
- Jeotermal enerjinin kaynağı yerküre çekirdeğidir. Çekirdek iç çekirdekten (demir merkezi) ve çok sıcak magmadan yapılmış dış çekirdeğinden oluşur.
- Bazı makul derinliklerde kayalar ve su magmanın ısısını emer. Bu alanlar jeotermal kaynaklar olarak nitelendirilmektedir. Kuyuları kazarak ve sıcak suyu yüzeye pompalayarak, jeotermal enerjiden faydalanırız.
- Jeotermal enerji kısaca yer ısısı olup, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaçların içerdiği ısı enerjisidir.

Yer kürenin iç kısmı.

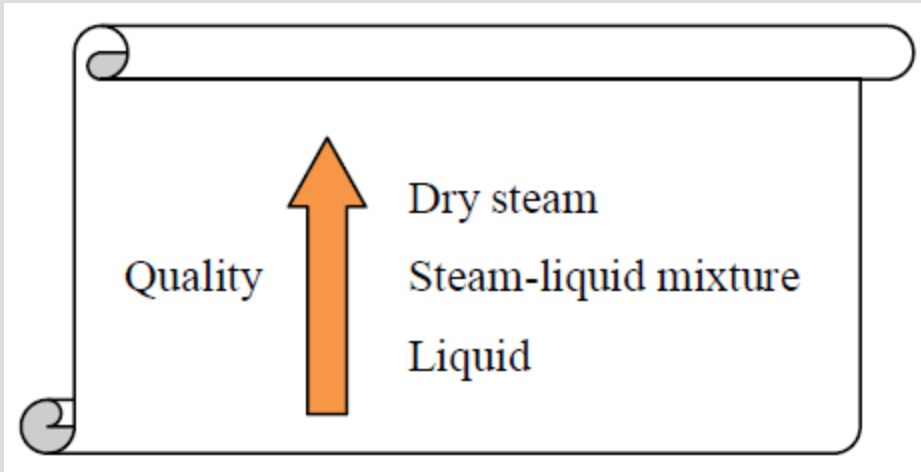


- Kara barındıran kıtalar ve okyanus zeminlerine yerkabuğu denir. Kabuğun kalınlığı kıtalarda 25 ila 55 km, okyanuslarda 5 ila 8 km'dir. Kabuk tektonik plakalardan oluşur. Volkanlar, magmaların kendisine yaklaşması nedeniyle bu plakaların kenarlarında görülür.
- Bazı makul derinliklerde kayalar ve su bu magmadan gelen ısıyı absorbe eder. Bu alanlar **jeotermal kaynaklar** olarak nitelendirilmektedir. Kuyular kazarak ve sıcak suyu yüzeye pompalayarak, jeotermal enerjiden faydalanırız.

- Jeotermal enerjinin kaynağı dünya **çekirdeğidir** ve yaklaşık 6500 km derinliğindedir. The core is made up of inner core (iron center) and outer core made up of very hot **magma**.
- Radyoaktif parçacıkların bozulması nedeniyle magmanın sıcaklığı çok yüksek kalır. Dış çekirdeğin kalınlığı yaklaşık 3000 km olan **manto (örtü)** ile çevrilidir. Manto magmadan ve kayalardan oluşmaktadır.

- **Jeotermal kaynaklar termal ve bileşim özelliklerine göre sınıflandırılabilir:**
- **Hidrotermal** Bunlar, buhar, karışım veya sıvı fazlarda yüksek sıcaklıkta su olarak bulunan bilinen jeotermal alanlardır.
- **Basıncılı yer altı enerjisi** Bu kaynaklar 150°C ila 180°C'de çok yüksek basınçlarda (600 bar'a kadar) sıcak sıvı su içerir. Bu dolgu maddesi dolu rezervuar içerisindeki sıvı metan ve çözünmüş katıların yüksek seviyelerini de içerir. Bu sıvı oldukça aşındırıcıdır ve bu nedenle hasat ve işlenmesi oldukça zordur.
- **Magma** Erimiş kaya olarak da adlandırılırlar ve genellikle 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda aktif volkanlar altında bulunurlar.
- **Enhanced** Buna ayrıca sıcak, kuru kaya jeotermal sistemleri denir. Bunlar doğal jeotermal kaynaklar değildir. Mantık sıcak kaya oluşumlarına yüksek basınçta su enjekte etmek ve elde edilen sıcak suyu yüzeye çıkarmaktır.
- Sadece hidrotermal kaynaklardan yararlanılmaktadır. Diğer üçünün muazzam enerji potansiyeline sahip olduğu tahmin ediliyor ancak mevcut teknolojiler bu kaynaklardan mümkün olan enerji üretimine izin vermiyor.
- Bir hidrotermal kaynağın kalitesi ve ömrü atık sıvıyı yere tekrar geri basarak uzatılabilir.

- Bir jeotermal kaynak, çevre sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta jeotermal suyu içermektedir. Jeotermal kaynakların yaygın bir sınıflandırması da kaynak sıcaklıklarına göre dir.
 - ✓ Yüksek sıcaklıkta kaynak: $T > 150^{\circ}\text{C}$
 - ✓ Orta sıcaklıkta kaynak : $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$
 - ✓ Düşük sıcaklık kaynağı : $T < 90^{\circ}\text{C}$
- Haznedeki jeotermal suyun durumu kızgınbuhar veya doymuş buhar (kuru buhar), doymuş buhar-sıvı karışımı veya sıvı (genellikle sıkıştırılmış sıvı) olabilir.
- Buhar yoğunluklu olan kaynaklar, entalpi ve ekserji (iş potansiyeli) değerlerinin yüksek olması nedeniyle, sıvı yoğunluklu kaynaklardan daha kaliteli bir kaynaktır.



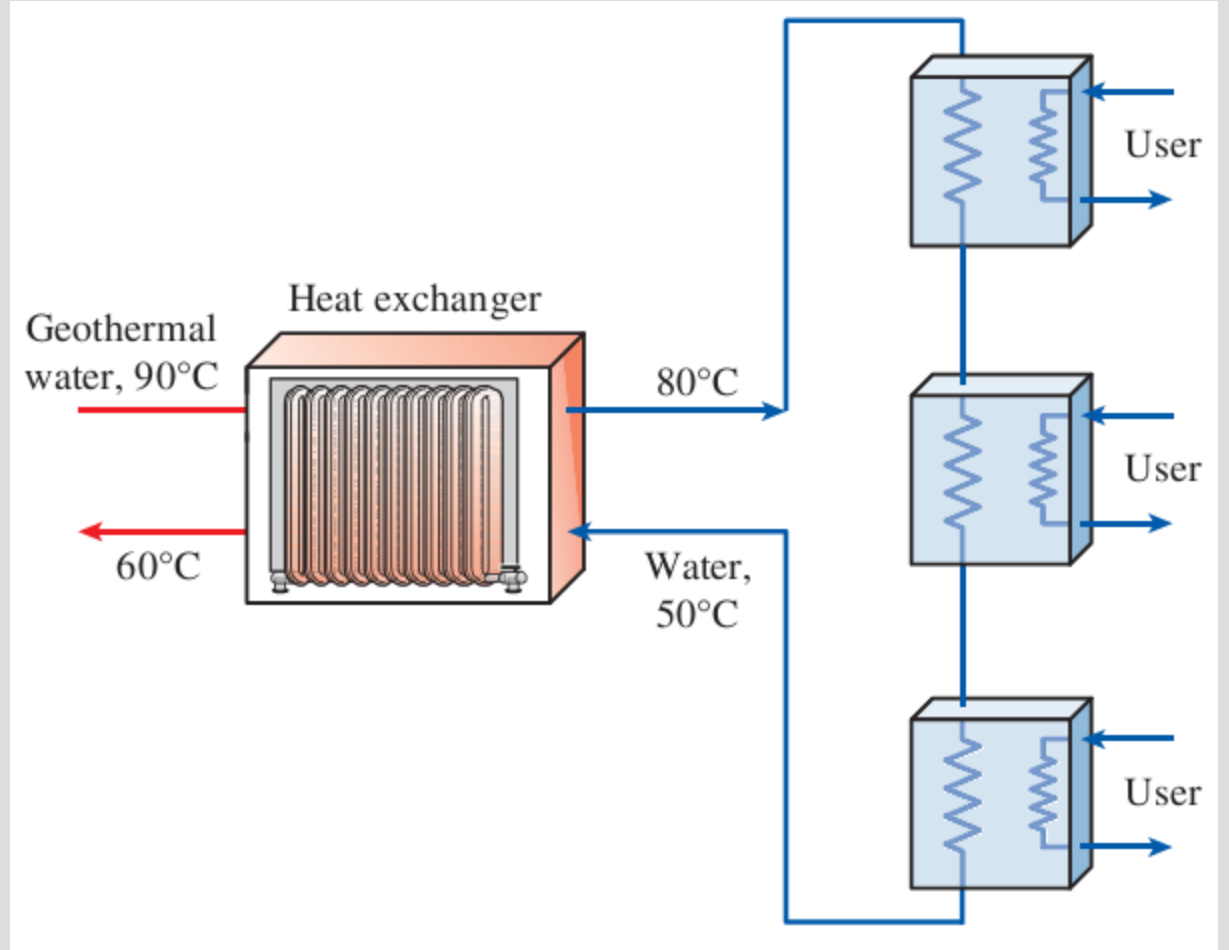
Bir jeotermal kaynağın kalitesi rezervuardaki akışkanın fazına (ve sıcaklığına) bağlıdır. Kalite ne kadar yüksek olursa çalışma potansiyeli de o kadar yüksek olur.

Jeotermal enerji sistemlerinden üretilen termal enerjiyi kullanmak için birçok seçenek vardır.

Electricity production Jeotermal enerji en yaygın olarak baz yüklü elektrik enerjisi üretimi için kullanılır. Jeotermal kaynaklardan enerji üreten teknoloji köklü bir yapıya sahiptir ve dünya çapında faaliyet gösteren çok sayıda jeotermal enerji santrali bulunmaktadır. Ekonomik bir elektrik güç üretimi için jeotermal kaynağın sıcaklığı yaklaşık 150°C veya daha yüksek olmalıdır.

Space heating Çok sayıda konut ve ticaret bölgesi, kışın dünyanın birçok yerinde düşük maliyetli jeotermal ısı ile etkili bir şekilde ısıtılır. En büyük bölgesel ısıtma tesisatlarından bazıları Çin, İsveç, İzlanda, Türkiye ve ABD'de. İzlanda'daki (küçük bir ülke) binaların neredeyse yüzde 90'ı kışın jeotermal ısı ile ısıtılıyor. Dünyada jeotermal ile sağlanan yıllık alan ısıtma miktarının yaklaşık 60.000 TJ olduğu tahmin edilmektedir.

Jeotermal ısı çoğunlukla bir bölgesel ısıtma sisteminde ortam ısıtma için kullanılır. Normalde, sıcak jeotermal su, istenmeyen kimyasal bileşim ve jeotermal tuzlu suyunun özellikleri nedeniyle sistemde doğrudan dolaştırılmamaktadır. Jeotermal suyun ısını temiz suya aktarmak için ısı değiştiriciler kullanılır ve bu ısınmış tatlı su sisteme gönderilir. Bu ısı binalara bireysel ısı eşanjörleri vasıtasıyla sağlanır.



Jeotermal bölge alan ısıtma sistemleri için yaygın bir çalışma modu. Sıcaklık değerleri temsilidir

Cogeneration Bir jeotermal kaynaktan elektrik ve ısı üreten bir kojenerasyon sistemi, kaynağın daha verimli kullanılmasını sağlar. Bu işlem, santralden çıkan kullanılmış jeotermal suyun, yere tekrar geri gönderilmeden önce ısıtma için kullanıldığı aşamalı bir uygulamadır. Jeotermal akışkan, kojenerasyon uygulamalarında tekli güç üretim sistemlerine kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda yere geri basılır. Bu, daha yüksek potansiyel gelirlere karşılık gelen belirli bir kaynak için çok daha yüksek bir kullanım oranını temsil eder.

Cooling Mahal soğutma uygulamaları için bir soğurmalı soğutma sistemine jeotermal ısı ile enerji sağlanabilir. Makul bir performans katsayısı ile absorpsiyonlu soğutma sistemi için jeotermal suyun sıcaklığı 95 °C'nin üzerinde olmalıdır. Bölgenin yıllık soğutma yüküne bağlı olarak jeotermal ısı kullanan bir bölgesel soğutma sistemi uygulanabilir. Soğutma için jeotermal ısı kullanımı yaygın değildir. Oregon Teknoloji Enstitüsünde kurulu bir jeotermal soğutma sisteminin yaklaşık 15 yılda kendisini geri ödemesi bekleniyordu.

Electricity production $\Rightarrow T > 120^{\circ}\text{C}$

Cooling $\Rightarrow T > 95^{\circ}\text{C}$

Heating $\Rightarrow T > 50^{\circ}\text{C}$

Jeotermal uygulamalar için yaklaşık sıcaklık gereksinimleri.

Isı pompası Yer kaynaklı ısı pompaları, belki de kurulu birimler sayısı bakımından jeotermal enerjinin en yaygın kullanımını temsil etmektedir. Bu ısı pompalarına, yer kürenin sıcaklığını kullandıkları için jeotermal ısı pompaları denir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, hava kaynaklı ünitelere kıyasla daha yüksek performans katsayısı (COP) değerlerine sahiptir. **Birkaç metre derinlikteki toprak tabakası, kışın ortam havasından daha yüksek sıcaklıktadır ve yaz aylarında ortamdaki havadan daha düşük sıcaklıktadır.** Bu sistemler, ısı emme (ısıtma modu) için kışın daha yüksek toprak yer sıcaklıklarını ve ısı atılımı (soğutma modu) için yaz aylarında daha serin yer toprak sıcaklıklarını kullanır ve bu da daha yüksek COP'lere sebep olur.

Jeotermal enerjinin diğer kullan alanları ise; bitki yetiştirme ve tahıl (sera), kereste, meyve ve sebzelerin kurutulması, kaplıcalar, tuzdan arındırma ve balık yetiştiriciliğidir.

Eski insanlar, jeotermal enerjiyi ısıtma ve banyo için kullanmışlardır. Dünyanın birçok yerinde, sıcak su kaynakları yüzme suyu için kullanılır, çünkü birçok kişi sıcak jeotermal sudaki minerallerin sağlık açısından yararlarına inanmaktadır.

Jeotermal Güç Üretimi

Jeotermal kaynakların yalnızca bir kısmı elektrik üretimine uygun olan yüksek sıcaklıklara sahiptir. Jeotermal enerji santralleri, dünyanın birçok yerinde yıllardır kullanılmaktadır.

İlk jeotermal enerji santrali 1904 yılında İtalya'da inşa edilmiştir. ABD'de ilk tesis 1960 yılında Kuzey Kaliforniya'nın Gayzerlerinde inşa edilmiştir. Ülkemizde ise Denizli Kızıldere'de 1974 yılında kurulmuştur.

ABD'de Kaliforniya, Nevada, Utah, Montana, Idaho ve Hawai'de bulunan yaklaşık 60 jeotermal enerji santrali bulunmaktadır. Halen 24 ülkede 12.000 MW'dan fazla jeotermal elektrik üretilmektedir.



Kızıldere III
Jeotermal Santrali,
Denizli.

| Durum | Güç (MWe) | Oran |
|-----------------------|-----------|-------|
| Devrede | 992 | %54,7 |
| Kurulumu devam eden | 201 | %11,1 |
| Üretim lisansı alınan | 31 | %1,7 |
| Önlisans alınan | 540 | %29,8 |
| Proje aşamasında | 50 | %2,7 |
| TOPLAM | 1.814 | %100 |

Jeotermal Enerji Santralleri Kurulu Güç ve Proje Kapasiteleri

Aktif Santral Sayısı : 36

Kurulu Güç : 992 MWe

Kurulu Güce Oranı : % 1,22

Yıllık Elektrik Üretimi : ~ 5.795 GWh

Üretimin Tüketime Oranı : % 2,23

| | | | | |
|----|--|---------|----------------------------|----------------------|
| 1) | Efeler Jeotermal Enerji Santrali | Aydın | Güriş Holding | 115 MW (162.3 MW) |
| 2) | Kızıldere 3 JES | Denizli | Zorlu Enerji | 99 MW (165 MW) |
| 3) | Kızıldere 2 Jeotermal Enerji Santrali | Denizli | Zorlu Enerji | 80 MW |
| 4) | Pamukören Jeotermal Santrali | Aydın | Çelikler Enerji | 68 MW |
| 5) | Galip Hoca Germencik JES | Aydın | Güriş Holding | 47 MW |
| 6) | Alaşehir Jeotermal Enerji Santrali | Manisa | Zorlu Enerji | 45 MW |
| 7) | Maren Jeotermal Enerji Santrali | Aydın | Kipaş Holding Enerji Grubu | 44 MW |

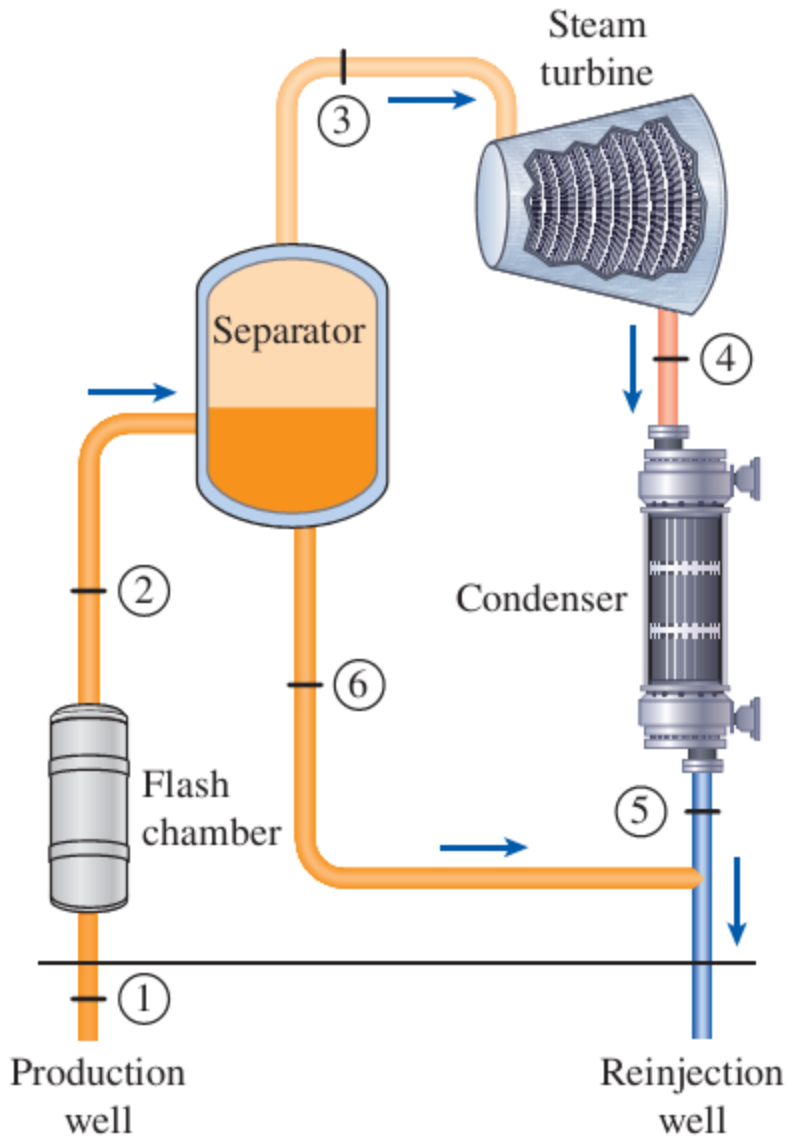


FIGURE 18-54

Single-flash geothermal power plant.

En basit jeotermal döngüsü **direkt buhar çevrimidir**. Jeotermal kuyudaki buhar bir türbinden geçirilir ve atmosfere veya bir yoğunlaştırıcıya boşaltılır.

Flash buhar santralleri, önemli derecede suyun bir veya iki basınç kademesinde yüzey ekipmanında buhar haline gelmesi için yeterince sıcak olan sıvı kaynaklı kaynaklardan güç üretmek için kullanılır.

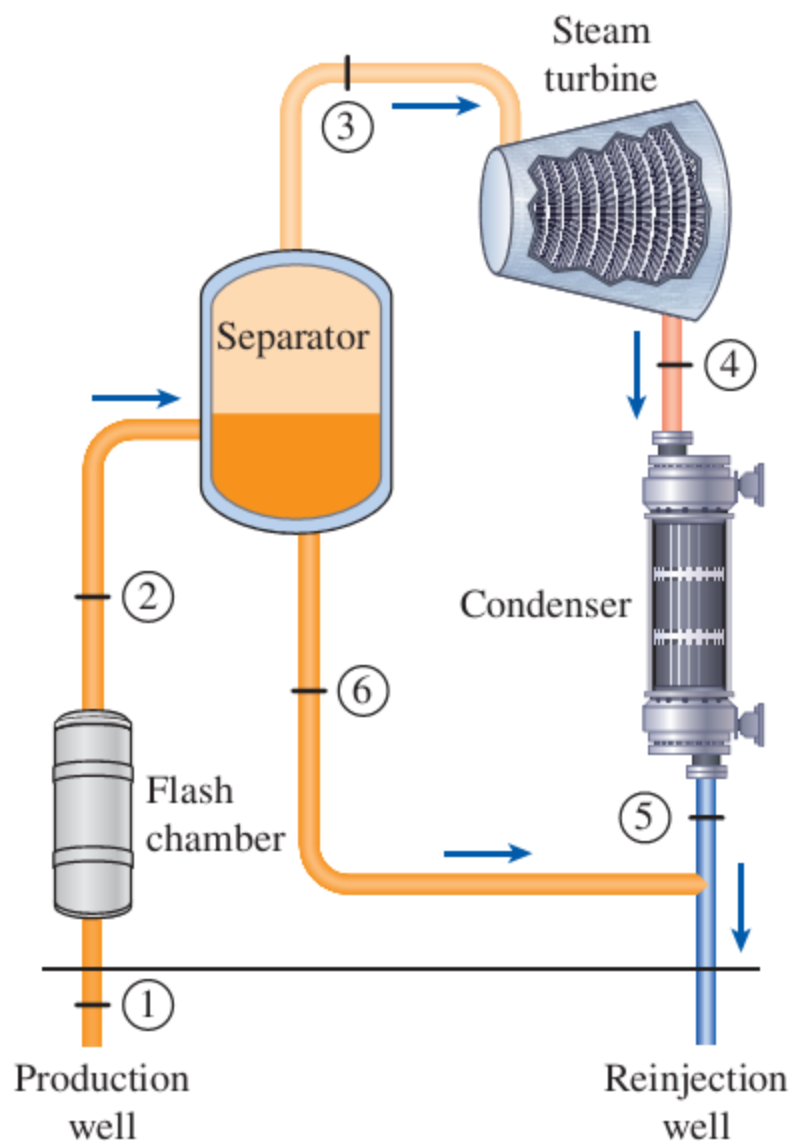


FIGURE 18–54

Single-flash geothermal power plant.

$$\dot{W}_{\text{out}} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}}$$

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{m}_1(h_1 - h_0)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4)}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{E}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}}$$

$$\dot{E}_{\text{out}} = \dot{m}_6(h_6 - h_0) + \dot{m}_4(h_4 - h_0)$$

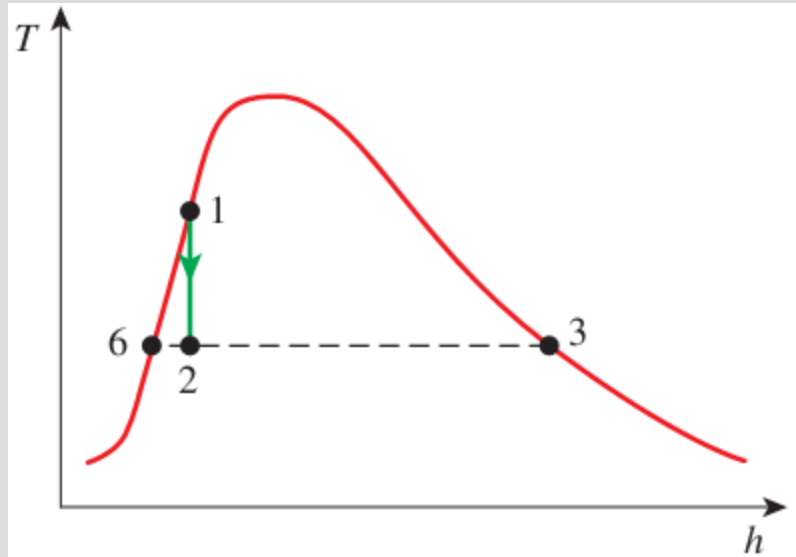
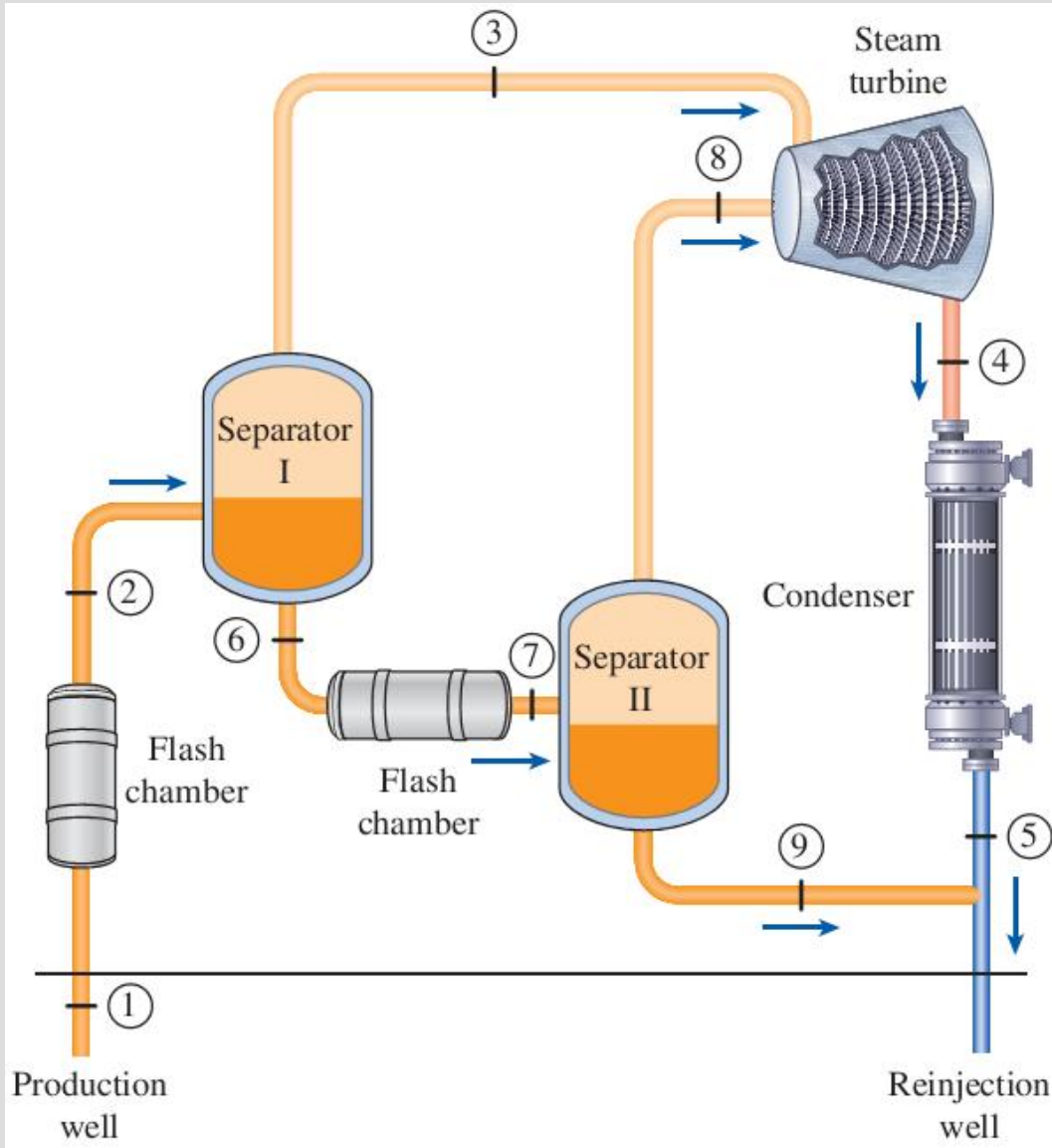


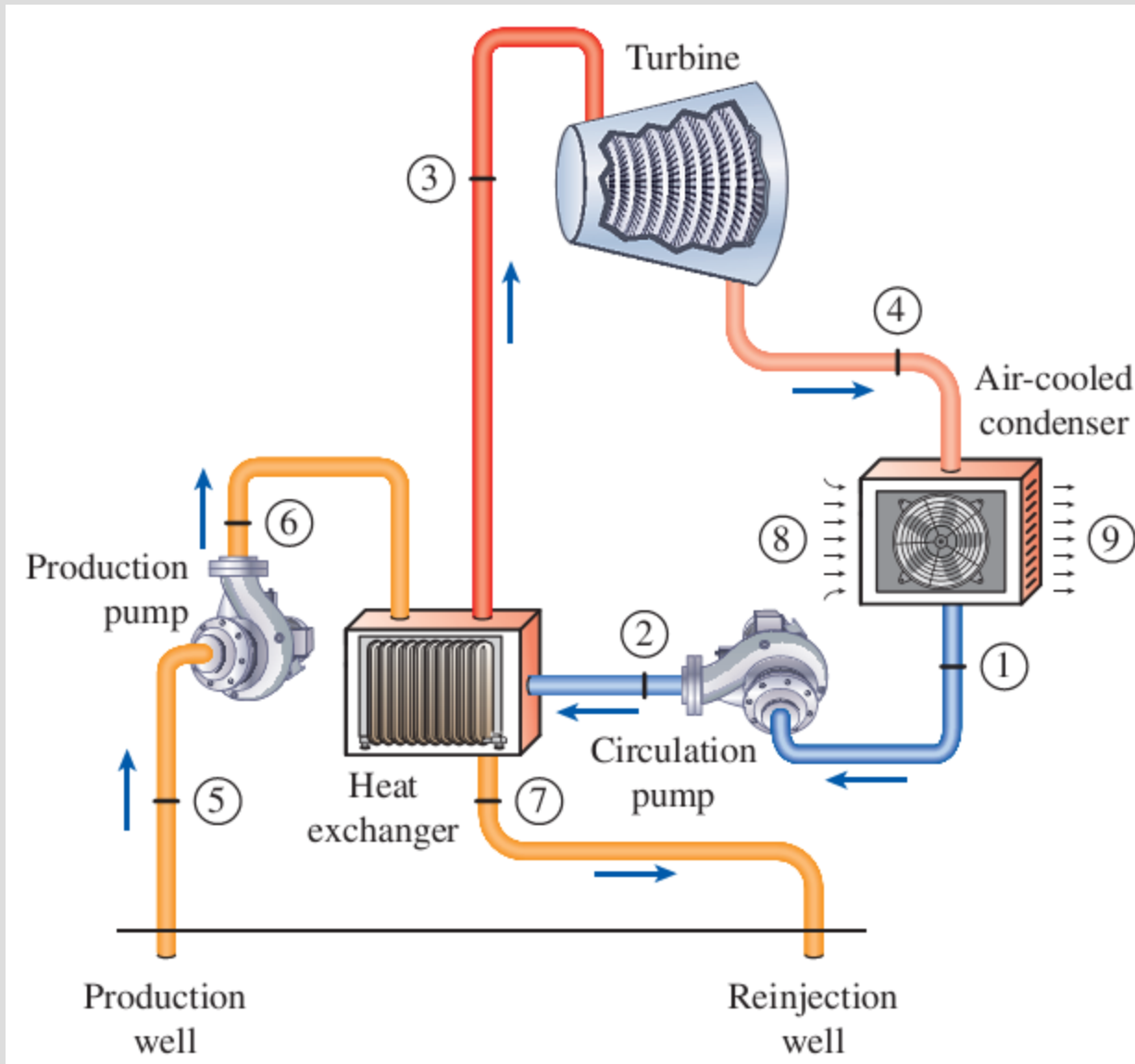
FIGURE 18-55

Flashing process in temperature-enthalpy diagram.



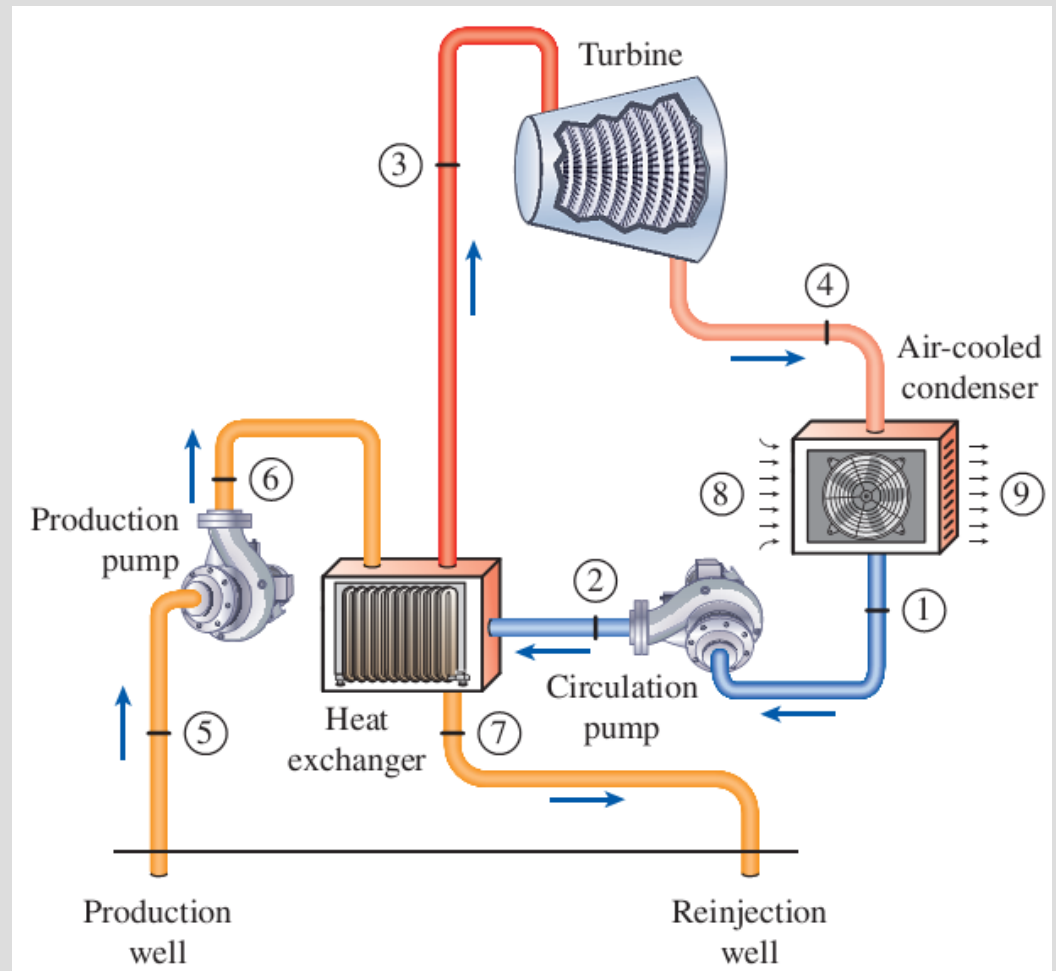
$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4) + \dot{m}_8(h_8 - h_4)}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$$

Double-flash geothermal power plant.



Binary jeotermal güç çevrimi.

Binary jeotermal güç santralleri, nispeten düşük sıcaklıklarda sıvı yoğunluklu kaynaklardan jeotermal su kullanmaktadır. Bu santraller düşük bir kaynama sıcaklığına sahip ikinci bir iş akışkanı (izobutan, pentan, izopentan, R-114 vb.) ile bir Rankine çevriminde çalışırlar.



$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = \frac{\dot{W}_{\text{turbine}} - \dot{W}_{\text{pump}} - \dot{W}_{\text{fan}}}{\dot{E}_{\text{in}}}$$

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{m}_5(h_5 - h_0)$$

$$\dot{W}_{\text{turbine}} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$$

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{m}_6(h_6 - h_7) = \dot{m}_2(h_3 - h_2)$$

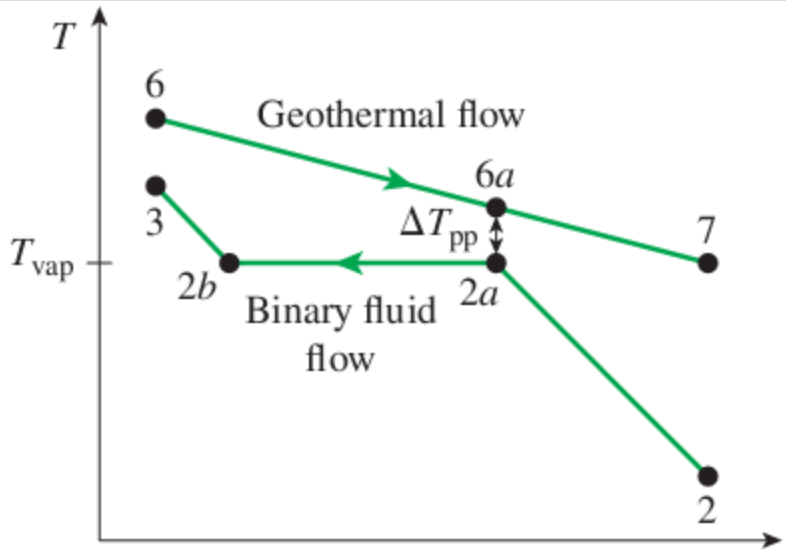


FIGURE 18–58

Heat exchange process between the geothermal brine and the binary working fluid in the heat exchanger of binary cycle power plant.

$$\dot{m}_{\text{geo}}(h_6 - h_{6a}) = \dot{m}_{\text{binary}}(h_3 - h_{2a})$$

$$\dot{m}_{\text{geo}}(h_{6a} - h_7) = \dot{m}_{\text{binary}}(h_{2a} - h_2)$$

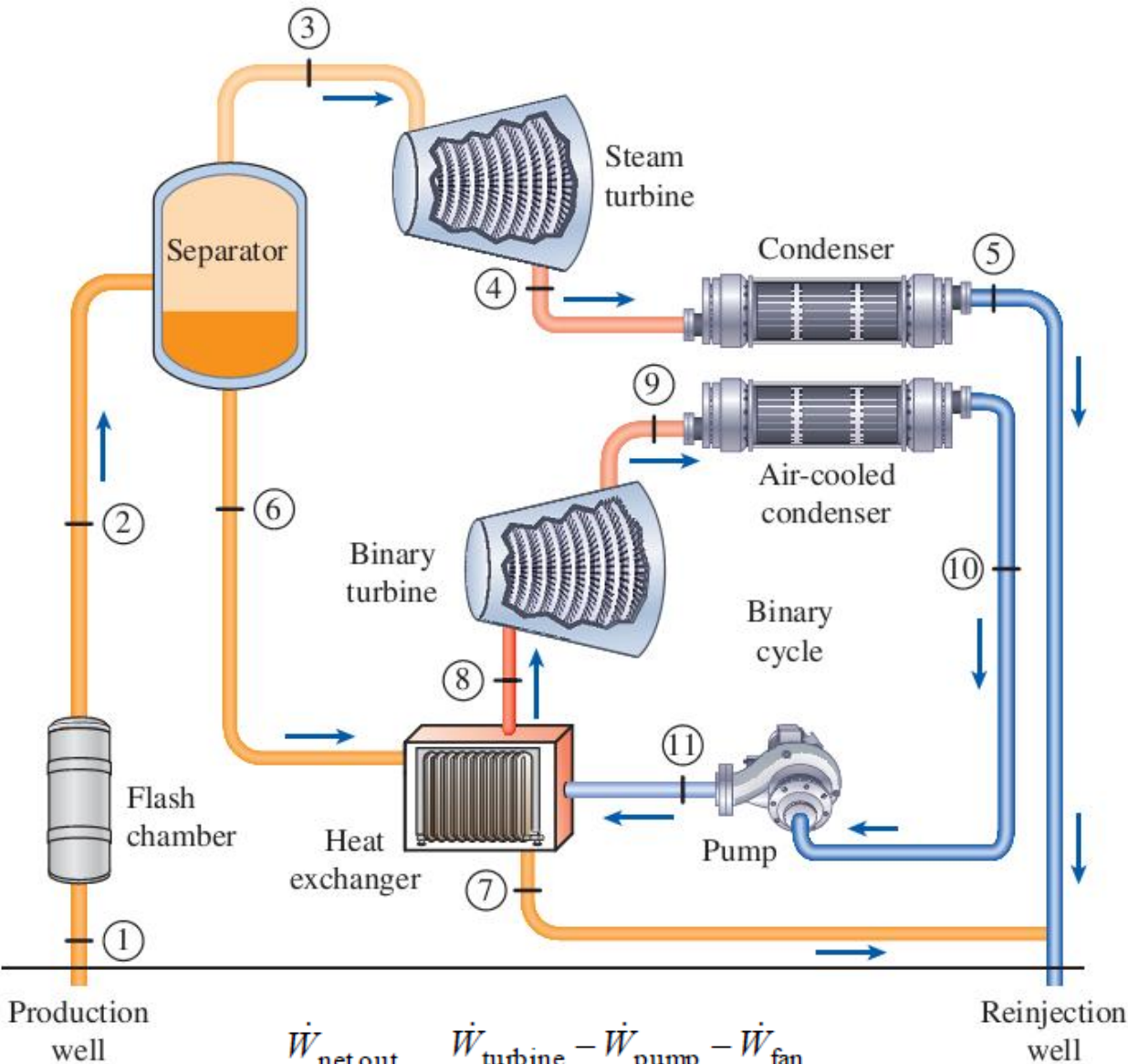
$$h_{2a} = h_f @ T_{\text{vap}}$$

$$h_{2b} = h_g @ T_{\text{vap}}$$

Sıcaklık farkına **pinch-point sıcaklık farkı** ΔT_{pp} denir.

6a durumuna jeotermal suyun **pinch noktası sıcaklığı** denir.

Kombine flaş-binary jeotermal enerji santrali.



$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pump} - \dot{W}_{fan}}{\dot{E}_{in}}$$

$$= \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4) + \dot{m}_8(h_8 - h_9) - \dot{W}_{pump} - \dot{W}_{fan}}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$$

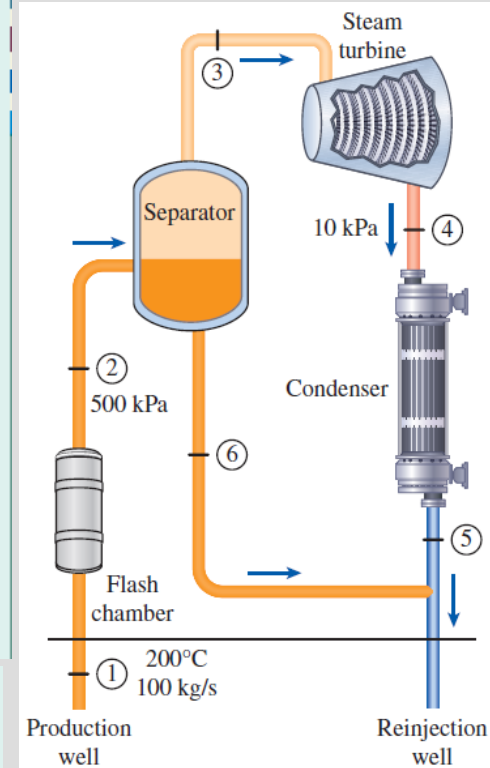
EXAMPLE 18-7 Thermodynamic and Economic Analysis of a Single-Flash Geothermal Power Plant

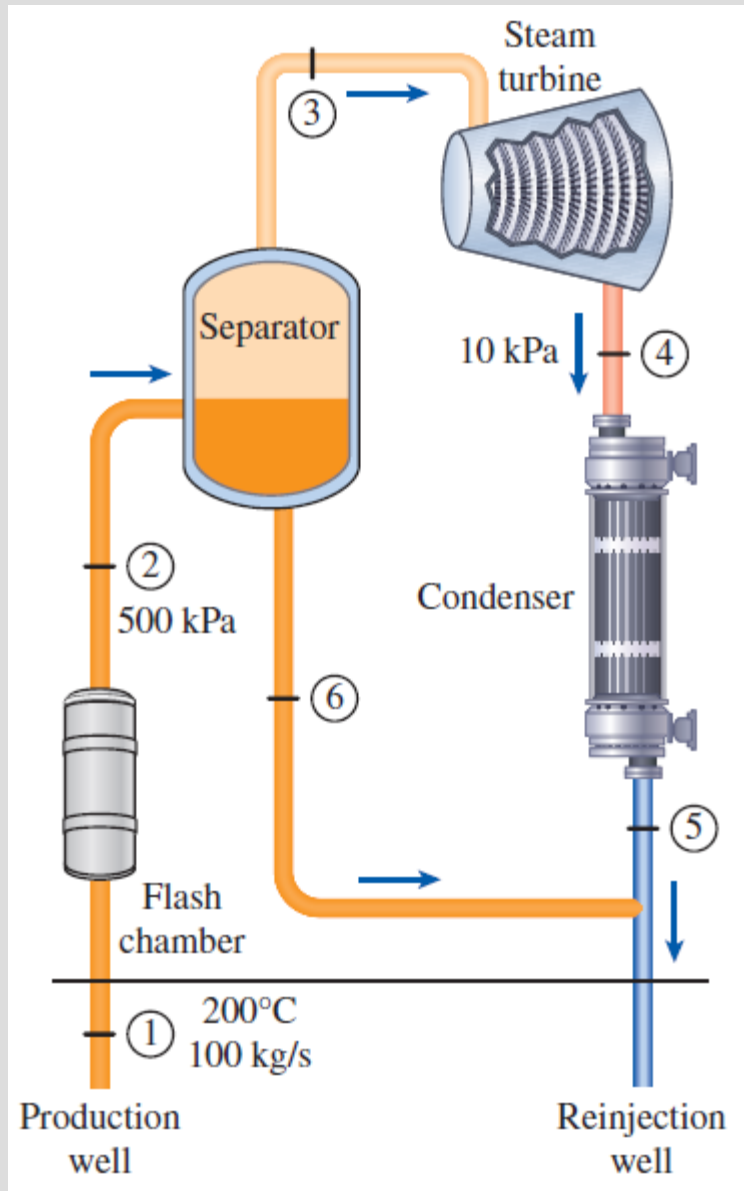
Geothermal liquid water at 200°C is extracted from a geothermal well at a rate of 100 kg/s . This water is flashed to a pressure of 500 kPa in the flash chamber of a single-flash geothermal power plant (Fig. 18–60). The condenser is maintained at a pressure of 10 kPa . The isentropic efficiency of the turbine is 83 percent .

- What is the mass flow rate of water vapor at the turbine inlet?
- Determine the power output from the turbine and the thermal efficiency of the plant.
- Assume this single-flash plant is retrofitted to operate as a double-flash plant (see Fig. 18–56). The first and second flash pressures are selected as 500 kPa and 150 kPa , respectively. What are the power output and thermal efficiency of this double-flash plant? Other parameters remain the same.

(d) Consider the single-flash plant again. Instead of retrofitting the plant to a double-flash design, the liquid water leaving the separator is to be used for district space heating of buildings. Assume the return temperature of geothermal water from the district is 60°C . Geothermal space heating will be replacing heating by natural gas heaters. Geothermal heat will be sold to the district at the same price as the natural gas heating. What is the annual potential revenue from the selling of geothermal heat to the district? The unit price of natural gas is $\$1.25/\text{therm}$ ($1\text{ therm} = 100,000\text{ Btu} = 105,500\text{ kJ}$) and the efficiency of natural gas heater is 83 percent . Take the annual heating hours to be 3000 h .

Compare this revenue to the selling of electricity from the plant. The selling price of electricity is $\$0.075/\text{kWh}$. Take the annual operating hours of the plant to be 8000 h .





Analysis (a) First, the properties of water at the flash chamber and separator are

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 200^\circ\text{C} \\ x_1 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} P_1 = 1554.9 \text{ kPa} \\ h_1 = 852.26 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad (\text{Table A-4})$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 500 \text{ kPa} \\ h_2 = h_1 = 852.26 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_2 = 151.83^\circ\text{C} \\ h_6 = h_f = 640.09 \text{ kJ/kg} \\ h_3 = h_g = 2748.1 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad (\text{Table A-5})$$

$$\left. \begin{array}{l} P_6 = 500 \text{ kPa} \\ x_6 = 0 \end{array} \right\} h_6 = 640.09 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Table A-5})$$

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 500 \text{ kPa} \\ x_3 = 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 2748.1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6.8207 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array} \quad (\text{Table A-5})$$

The enthalpy at the turbine exit for the isentropic process is

$$\left. \begin{array}{l} P_4 = 10 \text{ kPa} \\ s_4 = s_3 = 6.8207 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array} \right\} h_{4s} = 2160.2 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Table A-5})$$

Using the definition of the turbine isentropic efficiency, the actual enthalpy at the turbine exit is determined to be

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \longrightarrow 0.83 = \frac{2748.1 - h_4}{2748.1 - 2160.2} \longrightarrow h_4 = 2260.1 \text{ kJ/kg}$$

The quality of water at state 2 is

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{f@500 \text{ kPa}}}{h_{fg@500 \text{ kPa}}} = \frac{852.26 - 640.09}{2108.0} = 0.1006$$

The mass flow rate of liquid water at state 6 is

$$\dot{m}_6 = (1 - x_2)\dot{m}_1 = (1 - 0.1006)(100 \text{ kg/s}) = 89.94 \text{ kg/s}$$

Note that about 90 percent of the water extracted from the reservoir is sent to reinjection at a temperature of 151.8°C. The mass flow rate of steam at the turbine inlet is then

$$\dot{m}_3 = x_2\dot{m}_1 = (0.1006)(100 \text{ kg/s}) = \mathbf{10.06 \text{ kg/s}}$$

(b) The power output from the turbine is

$$\dot{W}_{\text{out}} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) = (10.06 \text{ kg/s})(2748.1 - 2260.1)\text{kJ/kg} = \mathbf{4909 \text{ kW}}$$

The enthalpy of saturated liquid water at 25°C is $h_0 = 104.83 \text{ kJ/kg}$ (Table A-4). The energy input to the power plant is

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{m}_1(h_1 - h_0) = (100 \text{ kg/s})(852.26 - 104.83)\text{kJ/kg} = 71,743 \text{ kW}$$

The thermal efficiency of the plant is then

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = \frac{4909 \text{ kW}}{71,743 \text{ kW}} = 0.0684 \text{ or } \mathbf{6.84\%}$$

(c) If this power plant is retrofitted to operate as a double-flash design, the properties at other states (see Fig. 18–56) would be

$$\left. \begin{array}{l} P_7 = 150 \text{ kPa} \\ h_7 = h_6 = 640.09 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_8 = 111.35^\circ\text{C} \\ h_9 = h_{f@150 \text{ kPa}} = 467.13 \text{ kJ/kg} \\ h_8 = h_{g@150 \text{ kPa}} = 2693.1 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad (\text{Table A-5})$$

The quality of water at state 7 is

$$x_7 = \frac{h_7 - h_{f@150 \text{ kPa}}}{h_{fg@150 \text{ kPa}}} = \frac{640.09 - 467.13}{2226.0} = 0.07770$$

The mass flow rate of saturated steam at state 8 is

$$\dot{m}_8 = x_7 \dot{m}_7 = (0.07770)(89.94 \text{ kg/s}) = 6.988 \text{ kg/s}$$

The additional power output from the turbine due to expansion of this additional steam in the turbine is

$$\dot{W}_{\text{out,additional}} = \dot{m}_8(h_8 - h_4) = (6.988 \text{ kg/s})(2693.1 - 2260.1) \text{ kJ/kg} = 3026 \text{ kW}$$

The thermal efficiency of the double-flash plant is then

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{out}}}{\dot{E}_{\text{in}}} = \frac{(4909 + 3026) \text{ kW}}{71,743 \text{ kW}} = 0.111 \text{ or } \mathbf{11.1\%}$$

(d) We note that the geothermal water is supplied to the district for space heating at 151.8°C (state 6) and returns at 60°C. The enthalpy of water at 60°C is

$$h_{\text{return}} = 251.18 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Table A-4})$$

This corresponds to a heating rate of

$$\dot{Q}_{\text{heat}} = \dot{m}_6(h_6 - h_{\text{return}}) = (89.94 \text{ kg/s})(640.09 - 251.18) \text{ kJ/kg} = 34,979 \text{ kW}$$

The amount of heat for a heating period of 3000 h, in therm, is

$$Q_{\text{heat}} = \dot{Q}_{\text{heat}} \Delta t = (34,979 \text{ kW})(3000 \text{ h}) \left(\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{1 \text{ therm}}{105,500 \text{ kJ}} \right) = 3.581 \times 10^6 \text{ therm}$$

The natural gas heater is 83 percent efficient and this means that when 100 units of heat supplied to the heater by burning natural gas, 83 units will be supplied by the heater as the useful space heat. Then, the amount of natural gas consumed is determined to be

$$\text{Gas consumption} = \frac{Q_{\text{heat}}}{\eta_{\text{heater}}} = \frac{3.581 \times 10^6 \text{ therm}}{0.83} = 4.314 \times 10^6 \text{ therm}$$

The annual potential revenue from selling the geothermal heat is

$$\begin{aligned} \text{Revenue from heat} &= \text{Gas consumption} \times \text{Unit price of natural gas} \\ &= (4.314 \times 10^6 \text{ therm})(\$1.25/\text{therm}) \\ &= \mathbf{\$ 5.392 \times 10^6} \end{aligned}$$

The plant produces 4909 kW of electricity. Noting that the annual operating period is 8000 h and the price of electricity is \$0.075/kWh, the annual potential revenue from selling electricity is

$$\begin{aligned} \text{Revenue from electricity} &= \dot{W}_{\text{out}} \times \Delta t \times \text{Unit price of electricity} \\ &= (4909 \text{ kW})(8000 \text{ h})(\$0.075/\text{kWh}) \\ &= \mathbf{\$ 2.945 \times 10^6} \end{aligned}$$

Discussion Therefore, the plant owner can make an additional \$5.39 million from selling geothermal heat by using otherwise reinjected geothermal brine. This is more than the revenue generated from selling electricity \$2.95 million. Also, additional potential revenue from the double-flash design would be much less than the revenue from district heating. Therefore, it is clear that utilization of geothermal energy for heating is more profitable than electricity generation. However, many geothermal resources are located in remote places, far from residential and commercial districts, and utilization of the resource for heating may not be an option.