

**DİKKAT: Aşağıdaki sorularda verilen TABLO numaraları, sizdeki tablo numaraları ile aynı değildir. Sizdeki numaralar buradakilerden -2 daha azdır.**

**Örnek 3.4 Doymuş sıvı-doymuş buhar karışımı-Basınç ve hacim hesabı**

Kapalı bir kaptaki 92°C sıcaklıkta 8.9 kg kütlede su vardır. Su kütleinin 7.1 kg kadarı sıvı ve kalanı ise buhar halindedir. Bu kapsamda kaptaki basıncı [kPa] olarak ve kabın hacmini [m<sup>3</sup>] olarak belirleyiniz.

Kapalı kap, sabit hacim ve sabit kütle içeren kapalı bir sistemdir. Bu problemde sistem “su” olarak verilmiştir. Su kütleisi, sıvı (doymuş sıvı) ve buhar (doymuş buhar) karışımından oluşmaktadır. Doymuş sıvı-doymuş buhar karışımında iki faz dengede bir arada bulunmaktadır ve basınç değeri verilen sıcaklıktaki doyma basıncına eşit olacaktır. (Buradaki sıcaklıkta doyma sıcaklığı olacaktır). Sıcaklık değeri verildiği için sıcaklığın başta olduğu Tablo 6 kullanılarak diğer özellikler interpolasyonla aşağıda verildiği gibi bulunabilir:

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 92^\circ\text{C} \rightarrow P = P_{\text{doyma}} = 75.712 \text{ kPa}$$

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 92^\circ\text{C} \rightarrow v_f = 0.001037 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 92^\circ\text{C} \rightarrow v_g = 2.1987 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kabın hacmi aşağıda verildiği gibi iki yöntemle hesaplanabilir. Birinci yöntem, doymuş sıvı ve doymuş buhar hallerine ait kütle ve özgül hacim değerlerinden yararlanmaktır.  $m_f = 8.9 \text{ kg}$  ve  $m_g = (8.9 - 7.1) \text{ kg} = 1.8 \text{ kg}$  için toplam hacim eşitliği aşağıda verildiği gibi yazılabilir:

$$V = V_f + V_g \rightarrow V = m_f v_f + m_g v_g$$

$$V = m_f v_f + m_g v_g \rightarrow V = (7.1 \text{ kg})(0.001037 \text{ m}^3/\text{kg}) + (1.8 \text{ kg})(2.1987 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$V = 3.965 \text{ m}^3$$

İkinci yöntem, Denklem (3.4) ile verilen kuruluk derecesi ve Denklem (3.5) ile verilen ortalama özgül hacim eşitliğinden yararlanmaktır. Bu çerçevede toplam kütle  $m = m_f + m_g = 8.9 \text{ kg}$  için aşağıda verildiği gibi toplam hacim bulunabilir:

$$x = \frac{m_g}{m} = \frac{m_g}{m_f + m_g} = \frac{1.8 \text{ kg}}{8.9 \text{ kg}} = 0.2022472 \text{ (\%20.22472)}$$

$$v = v_f + x v_{fg} \rightarrow v = (0.001037 \text{ m}^3/\text{kg}) + (0.2022472)(2.1987 - 0.001037) \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v = 0.4455 \text{ m}^3/\text{kg}$$

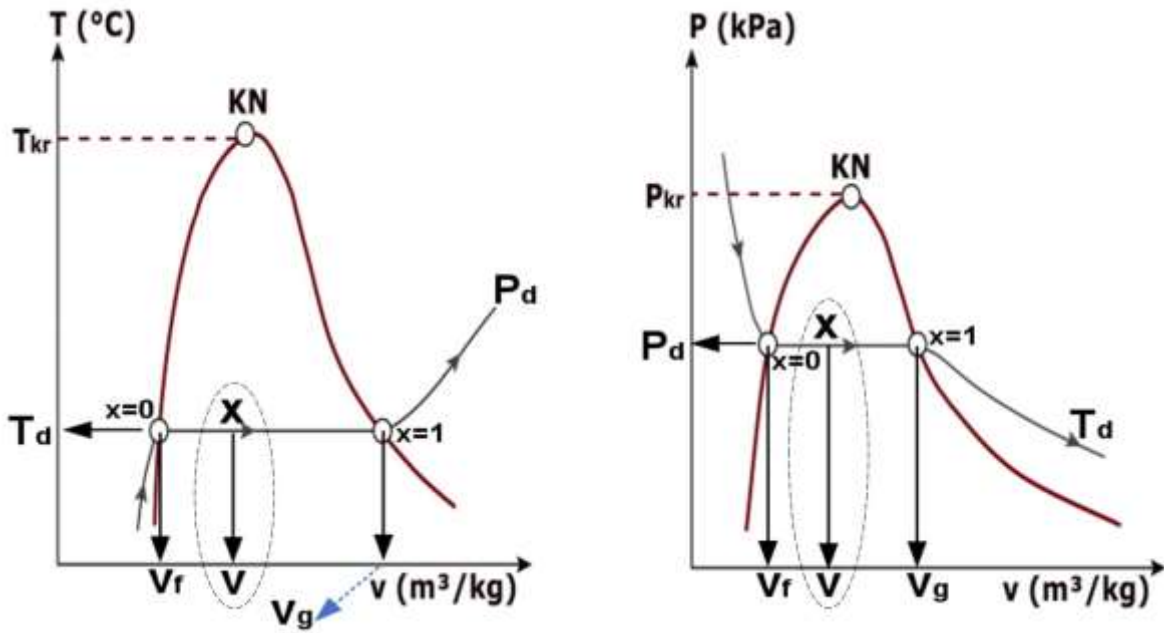
$$V = m v \rightarrow V = (8.9 \text{ kg})(0.4455 \text{ m}^3/\text{kg}) = 3.965 \text{ m}^3$$

Bu örnekte her iki faza ait kütleler verildiği için birinci yöntemde daha az işlem yapılmıştır. Ama çoğu durumda her iki fazın kütleleri her zaman mevcut olmaz ve birçok uygulamada ikinci yöntemin kullanılması gerekir.

Bu örnek bir hal değişimi ıçermemekte verilen özellik kapsamında sadece bir hale ait bilinmeyen özelliklerin saptanmasını ve hacmin hesaplanmasını ele almaktadır. Kuruluk derecesi de (kalite de) termodinamik bir özelliktir. Bu çerçevede  $T_d = 92^\circ\text{C}$  doyma sıcaklığı için  $T$  ( $^\circ\text{C}$ )- $v$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) diyagramı ve  $P_d = 75.712$  kPa doyma sıcaklığı için  $P$  (kPa)- $v$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) diyagramı aşağıda verildiği gibi çizilebilir. Şekil üzerinde çizgili elips içinde ıslak buhara ait kuruluk derecesi ( $x$ ) ve özgül hacim ( $v$ ) temsili olarak gösterilmiştir. Kuruluk derecesi ve özgül hacim aşağıda verilen sınırlar içinde yer almaktadır:

$$0 < (x = 0.2022472) < 1$$

$$(v_f = 0.001037 \text{ m}^3/\text{kg}) < (v = 0.4454 \text{ m}^3/\text{kg}) < (v_g = 2.1987 \text{ m}^3/\text{kg})$$



**Yorum:** Verilen basınç veya sıcaklıkta  $x=0$ ,  $v = v_f$ ,  $u = u_f$ ,  $h = h_f$  ve  $s = s_f$  ise doymuş sıvı noktasında  $x=1$ ,  $v = v_g$ ,  $u = u_g$ ,  $h = h_g$  ve  $s = s_g$  ise doymuş buhar noktasında ve  $0 < x < 1$ ,  $v_f < v < v_g$ ,  $u_f < u < u_g$ ,  $h_f < h < h_g$  ve  $s_f < s < s_g$  ise ıslak buhar bölgesinde çalışılmaktadır. Bunun yanında verilen basınçta yukarıda verilen şartlardan herhangi biri geçerli ise sıcaklık, doyma sıcaklığı ve verilen sıcaklıkta yukarıda verilen şartlardan herhangi biri geçerli ise basınç, doyma basıncı olmaktadır.

### Örnek 3.5 Doymuş sıvı-doymuş buhar karışımının özellikleri

75 litre hacmindeki kapalı bir kap içinde 350 kPa basınçta  $m = 3.8$  kg su vardır. Bu kapsamda suyun sıcaklığını [ $^\circ\text{C}$ ] olarak, kalitesini [%] olarak, suyun entalpisini [kJ] olarak ve doymuş buhar halinin kapladığı hacmi [ $\text{m}^3$ ] belirleyiniz.

Örnekte verilen bilgiler incelendiğinde, kap içindeki suyun sıkıştırılmış sıvı bölgesi, doymuş sıvı hali, ıslak buhar bölgesi, doymuş buhar hali ve kızgın buhar bölgesinden hangisinde yer aldığı anlaşılamamaktadır. Bu kapsamda 350 kPa basınç bilgisi dışında bir bilgiye daha gereksinim vardır. Hacim ve kütle verildiği için suyun özgül hacmi aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{(75 \text{ litre})(1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ litre})}{3.8 \text{ kg}} = \frac{0.075 \text{ m}^3}{3.8 \text{ kg}} = 0.01974 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

350 kPa basınçtaki doymuş sıvı hali ve doymuş buhar haline ait özgül ısılar Tablo 7 yardımıyla belirlenebilir:

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow v_f = 0.001079 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow v_g = 0.52422 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Hesaplanan özgül hacim değeri doymuş sıvı haline ait özgül hacim değerinden büyük ve doymuş buhar haline ait özgül hacim değerinden küçüktür:  $v_f < v < v_g$ .  $v$  değeri arada kaldığı için su ıslak buhar bölgesindedir. Bu kapsamda basınç, doyma basıncı ve sıcaklıkta doyma sıcaklığı olacaktır. Suyun sıcaklığı Tablo 7 yardımıyla okunabilir:

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow T_{\text{doyma}} = 138.86^\circ\text{C}$$

Su, ıslak buhar bölgesinde yer aldığı için sadece bu bölgede geçerli olan kuruluk derecesi (kalite) Denklem (3.6) yardımıyla hesaplanır:

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{(0.01974 - 0.001079) \text{ m}^3 / \text{kg}}{(0.52422 - 0.001079) \text{ m}^3 / \text{kg}} = 0.03567 \text{ (%3.567)}$$

Bu kuruluk derecesine ait özgül entalpi değerini hesaplayabilmek için doymuş sıvı hali ve doymuş buhar haline ait özgül entalpi değerlerinin Tablo 7 yardımıyla belirlenmesi gerekmektedir. Değerler belirlendikten sonra Denklem (3.8) ile yardımıyla özgül entalpi miktarı hesaplanır:

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow h_f = 584.26 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow h_{fg} = 2147.7 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow h_g = 2732.0 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$h = h_f + xh_{fg} \rightarrow h = (584.26 \text{ kJ} / \text{kg}) + (0.03567)(2147.7 \text{ kJ} / \text{kg}) = 660.87 \text{ kJ} / \text{kg}$$

Doymuş buhar halinin kapladığı hacmi hesaplamadan önce Denklem (3.4) yardımıyla doymuş buhar halinin kütlesi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$x = \frac{m_g}{m} \rightarrow m_g = xm \rightarrow m_g = (0.03567)(3.8 \text{ kg}) = 0.13555 \text{ kg}$$

Doymuş buhar halinin kütlesi belirlendikten sonra doymuş buhar halinin hacmi aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$V_g = m_g v_g \rightarrow V_g = (0.13555 \text{ kg})(0.52422 \text{ m}^3 / \text{kg}) = 0.071 \text{ m}^3 \text{ (71 litre)}$$

(75 litre) – (71 litre) = 4 litre hacminde doymuş sıvı su vardır.

### Örnek 3.6 Kızgın buhar bölgesi özellikleri

Hacmi  $V = 0.21144 \text{ m}^3$  olan kapalı bir kap içinde  $m = 1 \text{ kg}$  kütlede su vardır. Suyun başlangıçtaki basıncı  $2 \text{ MPa}$  olarak verilmiştir ve su  $50^\circ\text{C}$  sıcaklığa soğutulmaktadır. Bu kapsamda suyun başlangıçtaki sıcaklığını  $[\text{°C}]$  olarak, iç enerjisini  $[\text{kJ/kg}]$  olarak, özgül entalpisini  $[\text{kJ/kg}]$  olarak ve özgül entropisini  $[\text{kJ/kgK}]$  olarak belirleyiniz. Suyun son haline ait basıncı  $[\text{kPa}]$  olarak ve iç enerjisini  $[\text{kJ/kg}]$  olarak bulunuz.

Suyun başlangıçtaki halini belirlemek için birbirinden bağımsız iki adet özelliğin bilinmesi gerekmektedir. Başlangıç basıncı  $2 \text{ MPa}$  ise, ikinci özellik hacim ve kütle verildiği için özgül hacim olacaktır. Özgül hacim aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.21144 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Bulunan özgül hacim Tablo 7 yardımıyla,  $2 \text{ MPa}$  değerindeki doyma basıncına ait doymuş sıvı özgül hacmi ve doymuş buhar özgül hacmi ile karşılaştırılabilir:

$$P = P_{\text{doyma}} = 2 \text{ MPa} = 2000 \text{ kPa} \rightarrow v_f = 0.001177 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$P = P_{\text{doyma}} = 2 \text{ MPa} = 2000 \text{ kPa} \rightarrow v_g = 0.099587 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$(v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}) > (v_g = 0.099587 \text{ m}^3 / \text{kg})$  olduğu için su başlangıçta kızgın buhar bölgesindedir. Bu çerçevede suyun termodinamik özellikleri,  $P = 2 \text{ MPa}$  ve  $v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}$  için Tablo 8 yardımıyla (interpolasyonla) aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$P = 2 \text{ MPa} \text{ ve } v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg} \rightarrow T = 650^\circ\text{C}$$

$$P = 2 \text{ MPa} \text{ ve } v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg} \rightarrow u = 3381.6 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = 2 \text{ MPa} \text{ ve } v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg} \rightarrow h = 3804.5 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = 2 \text{ MPa} \text{ ve } v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg} \rightarrow s = 7.8276 \text{ kJ} / \text{kgK}$$

Su sabit hacimli ve sabit kütleli kapalı bir kap içinde olduğundan dolayı sabit hacimde sıcaklık değeri  $50^\circ\text{C}$  olana kadar soğutulmaktadır. Bu çerçevede suyun son hali için birbirinden bağımsız sıcaklık ve özgül hacim özellikleri kullanılarak son halin hangi bölgede olduğu Tablo 6 yardımıyla saptanabilir:

$$T = T_{\text{doyma}} = 50^\circ\text{C} \rightarrow v_f = 0.001012 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T = T_{\text{doyma}} = 50^\circ\text{C} \rightarrow v_g = 12.026 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$(v_f = 0.001012 \text{ m}^3 / \text{kg}) < (v = 0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}) < (v_g = 12.026 \text{ m}^3 / \text{kg})$  olduğu için suyun son hali ıslak buhar bölgesindedir. Islak buhar bölgesine ait özellikler kuruluk derecesi ve Denklem (3.5) yardımıyla aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$v = v_f + xv_{fg} \rightarrow (0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}) = (0.001012 \text{ m}^3 / \text{kg}) + x(12.026 \text{ m}^3 / \text{kg})$$

$$(0.21144 \text{ m}^3 / \text{kg}) = (0.001012 \text{ m}^3 / \text{kg}) + x(12.026 \text{ m}^3 / \text{kg}) \rightarrow x = 0.017498$$

Suyun son hali ıslak buhar bölgesinde olduğu için son hale ait basınç, doyma basıncı ve sıcaklık, doyma sıcaklığı olacaktır. Tablo 6 yardımıyla  $T = T_{\text{doyma}} = 50^{\circ}\text{C}$  için  $P = P_{\text{doyma}} = 12.352 \text{ kPa}$  olarak saptanır. Son hale ait özgül iç enerji değeri ise Denklem (3.7) yardımıyla aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$T = T_{\text{doyma}} = 50^{\circ}\text{C} \rightarrow u_f = 209.33 \text{ kJ/kg}$$

$$T = T_{\text{doyma}} = 50^{\circ}\text{C} \rightarrow u_{fg} = 2233.4 \text{ kJ/kg}$$

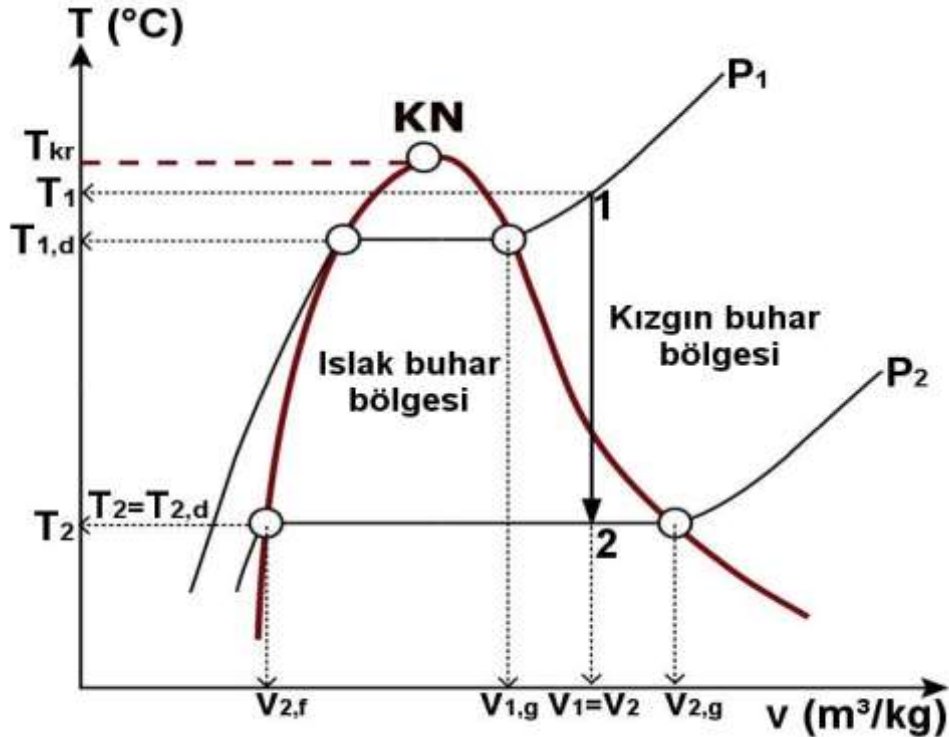
$$T = T_{\text{doyma}} = 50^{\circ}\text{C} \rightarrow u_g = 2442.7 \text{ kJ/kg}$$

$$u = u_f + xu_{fg} \rightarrow u = (209.33 \text{ kJ/kg}) + (0.017498)(2233.4 \text{ kJ/kg})$$

$$u = (209.33 \text{ kJ/kg}) + (0.017498)(2233.4 \text{ kJ/kg}) \rightarrow u = 248.41 \text{ kJ/kg}$$

**Yorum:** Kızgın buhar bölgesindeki suyu sabit basınçta ıslak buhar bölgesine getirmek için (suyu soğutmak için) sudan;  $(3381.6 \text{ kJ/kg}) - (248.41 \text{ kJ/kg}) = 3133.19 \text{ kJ/kg}$  miktarda ısı çekilmesi gerekmektedir. Sudan olan ısı çıkışı termodinamiğin birinci yasasına ait enerji dengesi eşitliği ile belirlenebilir.

Bu örnek için  $T (^{\circ}\text{C})$ - $v (\text{m}^3/\text{kg})$  diyagramı aşağıda verildiği gibi çizilebilir. İlk hal "1" ile ve son hal "2" ile gösterilirse, 1 noktasından 2 noktasına doğru sabit hacimde soğutma (ısı çıkışı) işlemi için işlem yönü aşağıya doğru olacaktır. Soğutma işlemi  $P_1$  basıncı ile  $P_2$  basıncı ve  $T_1$  ile  $T_2$  sıcaklığı arasında gerçekleşecektir. Kritik nokta (KN) için özgül hacim değeri  $v_{kr} = 0.003106 \text{ m}^3/\text{kg}$  değerindedir.  $v_1 = v_2 = 0.21144 \text{ m}^3/\text{kg}$  değerinde olduğu ve  $v_1 = v_2 > v_{kr}$  olduğu için 2 noktası, ıslak buhar bölgesinde kritik noktanın sağında yer almıştır. Benzer şekilde  $P$  (kPa)- $v (\text{m}^3/\text{kg})$  diyagramı da çizilebilir.



### Örnek 3.7 Sıkıştırılmış sıvı bölgesi özellikleri

(a) Sıcaklığı **90°C** ve basıncı **75 kPa** olan suya ait özgül hacim, özgül iç enerji, özgül entalpi ve özgül entropi özelliklerini belirleyiniz.

Öncelikle Tablo 6 yardımıyla  $T = 90^\circ\text{C}$  sıcaklık için doyma basıncı değeri  $P_d = 70.183 \text{ kPa}$  olarak okunur. Verilen basınç değeri doyma basıncından büyük olduğu için sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu saptanır. (Bunun yanında Tablo 7 yardımıyla  $P = 75 \text{ kPa}$  basınç için doyma sıcaklığı değeri  $T_d = 91.76^\circ\text{C}$  olarak okunur ve verilen sıcaklık değeri doyma sıcaklığı değerinden küçük olduğu için sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu belirlenebilir).

Verilen basınç değeri  $5 \text{ MPa}$  değerinden küçük olduğu ve sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu için sadece Tablo 6 yardımıyla suya ait özellikler aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$T = 90^\circ\text{C} \rightarrow v \cong v_f = 0.001036 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T = 90^\circ\text{C} \rightarrow u \cong u_f = 376.97 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$T = 90^\circ\text{C} \rightarrow h \cong h_f = 377.04 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$T = 90^\circ\text{C} \rightarrow s \cong s_f = 1.1929 \text{ kJ}/\text{kgK}$$

Özgül entalpi değeri Denklem (3.10) yardımıyla da aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$h \cong h_f + v_f (P - P_{\text{doyma}}) \rightarrow h \cong (377.04 \text{ kJ}/\text{kg}) + (0.001036 \text{ m}^3/\text{kg})(75 - 70.183) \text{ kPa}$$
$$h \cong 377.045 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Yukarıda elde edilen sonuç kapsamında düşük basınç ve düşük sıcaklıklarda ( $T < 100^\circ\text{C}$ )  $h \cong h_f$  alınabilir.

(b) Sıcaklığı **100°C** ve basıncı **5 MPa** olan suya ait özgül hacim, özgül iç enerji, özgül entalpi ve özgül entropi özelliklerini belirleyiniz.

Öncelikle Tablo 6 yardımıyla  $T = 100^\circ\text{C}$  sıcaklık için doyma basıncı değeri  $P_d = 101.42 \text{ kPa}$  olarak okunur. Verilen basınç değeri doyma basıncından büyük olduğu için sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu saptanır. (Bunun yanında Tablo 7 yardımıyla  $P = 5 \text{ MPa} = 5000 \text{ kPa}$  basınç için doyma sıcaklığı değeri  $T_d = 263.94^\circ\text{C}$  olarak okunur ve verilen sıcaklık değeri doyma sıcaklığı değerinden küçük olduğu için sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu belirlenebilir).

Verilen basınç değeri  $5 \text{ MPa}$  değerine eşit olduğu ve sıkıştırılmış sıvı bölgesinde bulunduğu için Tablo 9 yardımıyla suya ait özellikler aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

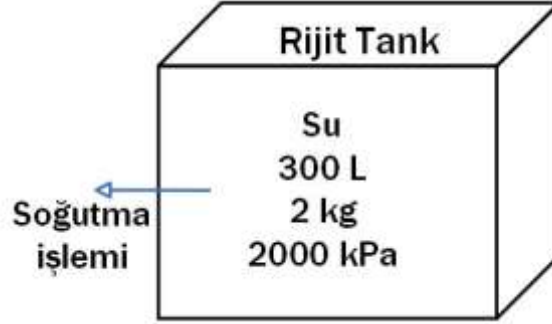
$$P = 5 \text{ MPa ve } T = 100^\circ\text{C} \rightarrow v = 0.0010410 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P = 5 \text{ MPa ve } T = 100^\circ\text{C} \rightarrow u = 417.65 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$P = 5 \text{ MPa ve } T = 100^\circ\text{C} \rightarrow h = 422.85 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$P = 5 \text{ MPa ve } T = 100^\circ\text{C} \rightarrow s = 1.3034 \text{ kJ}/\text{kgK}$$

**Soru-Sabit Hacim Problemi:** Şekil ile verildiği gibi, **300 litre** (300 L) değerinde hacme sahip rijit bir tankın içinde **2 kg** kütledeki su vardır ve suyun başlangıçtaki basıncı **2000 kPa** olarak ölçülmüştür. Bir soğutma işlemi ile tankın sıcaklığı **60°C** değerine getiriliyor. Suyun ilk sıcaklığını [°C] olarak, son basıncını [kPa] olarak ve eğer varsa son durumdaki kuruluk derecesini [%] olarak belirleyiniz.



**Çözüm** Rijit tank, rijit depo, rijit kap, kapalı tank, kapalı depo, kapalı kap, tank, depo ve kap gibi ifadeler termodinamikte sabit hacim işlemlerini içerir. Bu kapsamda kapalı kap tamamen akışkan ile doludur ve kapalı sistemin hacmi ve özgül hacmi değişmez. Bunun yanında sistemin kütlesi de değişmez. Bu soruda sabit hacim işlemi yanında soğutma (sistemden ısı çıkışı) işlemi de vardır.

**Bu soru, sabit hacim-sabit kütle-soğutma işlemi içeren bir kapalı sistem problemidir.**

**Verilenler** Rijit tankın (sistemin) hacmi:  $V = 300 \text{ litre} = 0.30 \text{ m}^3$   
Sistemin kütlesi:  $m = 2 \text{ kg}$   
Sistemin başlangıçtaki basıncı:  $P_1 = 2000 \text{ kPa} = 2 \text{ MPa}$   
Sistemin son sıcaklığı:  $T_2 = 60^\circ\text{C}$

**Kabul** Rijit tankın boyutları (hacmi) basınç ile değişmemektedir.

**Çözüm** Sistem “su” olarak alınacaktır ve sistemin hacmi ile kütlesi değişmemekte ve sistemden çevreye ısı çıkışı (soğutma işlemi) olmaktadır. Sistem hal 1’den hal 2’ye gelmektedir. Sisteme ait hacim ve kütle verildiği için sistemin sabit özgül hacmi aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$v = v_1 = v_2 = \frac{V}{m} = \frac{0.30 \text{ m}^3}{2 \text{ kg}} = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Özgül hacim belirlendikten sonra hal 1 için iki adet birbirinden bağımsız özellik; basınç ve özgül hacim olarak alınabilir.  $P_1 = 2 \text{ MPa}$  ve  $v_1 = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$  için öncelikle hal 1’in hangi bölgede olduğu saptanmalıdır. Basınç verildiği için Tablo 7 yardımıyla doymuş sıvı özgül hacim değeri ile doymuş buhar özgül hacim değeri okunarak hal 1’e ait özgül hacim değeri ile karşılaştırma yapılır:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 2 \text{ MPa} \\ v_1 = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right\} 2 \text{ MPa için } \left\{ \begin{array}{l} v_{f,1} = 0.001177 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{g,1} = 0.099587 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$$

$v_1 > v_{g,1}$  olduğu için su başlangıçta kızgın buhar bölgesindedir. Bu çerçevede Tablo 8 kullanılarak,  $P_1 = 2$  MPa basıncı ve  $v_1 = 0.15$  m<sup>3</sup>/kg özgül hacmi için  $T_1$  sıcaklığı interpolasyon ile aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\frac{T_1 - 350^\circ\text{C}}{(400 - 350)^\circ\text{C}} = \frac{v_1 - 0.13860 \text{ m}^3/\text{kg}}{(0.15122 - 0.13860) \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$\frac{T_1 - 350^\circ\text{C}}{(400 - 350)^\circ\text{C}} = \frac{(0.15 - 0.13860) \text{ m}^3/\text{kg}}{(0.15122 - 0.13860) \text{ m}^3/\text{kg}} \rightarrow T_1 = 395.17^\circ\text{C}$$

**Suyun ilk sıcaklığı 395.17°C olarak belirlenmiştir.**

Hal 2 için iki adet birbirinden bağımsız özellik; sıcaklık ve özgül hacim olarak alınabilir.  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  ve  $v_2 = v_1 = 0.15$  m<sup>3</sup>/kg için öncelikle hal 2'nin hangi bölgede olduğu saptanmalıdır. Sıcaklık verildiği için Tablo 6 yardımıyla doymuş sıvı özgül hacim değeri ile doymuş buhar özgül hacim değeri okunarak hal 2'e ait özgül hacim değeri ile karşılaştırma yapılır:

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = 60^\circ\text{C} \\ v_2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right\} 60^\circ\text{C için} \left\{ \begin{array}{l} v_{f,2} = 0.001017 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg,2} = 7.665983 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{g,2} = 7.667000 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$$

$v_{f,2} < v_2 < v_{g,2}$  olduğu için su son durumda (hal 2'de) ıslak buhar bölgesindedir. Bu çerçevede Tablo 6 kullanılarak  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  sıcaklık için  $P_2$  basıncı saptanır.  $P_2$  basıncı aynı zamanda doyma basıncına eşit olacaktır:  $P_2 = P_{d,2} = 19.947$  kPa.

**Suyun son basıncı 19.947 kPa olarak belirlenmiştir.**

Kuruluk derecesi (kalite) sadece ıslak buhar bölgesinde geçerlidir ve Hal 2, ıslak buhar bölgesinde (doymuş sıvı-doymuş buhar bölgesinde) olduğu için kuruluk derecesi Denklem (3.5) eşitliğinden yararlanılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$v = v_f + x v_{fg} \rightarrow v_2 = v_{f,2} + x_2 v_{fg,2}$$

$$v_2 = v_{f,2} + x_2 v_{fg,2} \rightarrow (0.15 \text{ m}^3/\text{kg}) = (0.001017 \text{ m}^3/\text{kg}) + (x_2)(7.665983 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$x_2 = 0.01943 \text{ (%1.943)}$$

**Suyun son durumdaki kuruluk derecesi %1.943 olarak belirlenmiştir.**

**Yorum:** Suyun kritik noktaya ait özgül hacim değeri 0.003106 m<sup>3</sup>/kg değerindedir ve  $v = v_1 = v_2 = 0.15$  m<sup>3</sup>/kg değerinde olduğu için ( $v > v_{KN}$ ) hal 1 ve hal 2 kritik noktanın sağ tarafında yer almaktadır. Bu çerçevede bu soruya ait T (°C)-v (m<sup>3</sup>/kg) diyagramı, Örnek 3.5 ile verilen diyagram gibi olacaktır. Benzer şekilde P (kPa)-v (m<sup>3</sup>/kg) diyagramı da çizilebilir. Kuruluk derecesi bulunduktan sonra ıslak buhar bölgesindeki suya ait sıvı ve buhar kütleleri de aşağıda verildiği gibi Denklem (3.4) yardımıyla bulunabilir:



$$x = \frac{m_g}{m} \rightarrow 0.01943 = \frac{m_g}{2 \text{ kg}} \rightarrow m_g = 0.039 \text{ kg}$$

$$m = m_f + m_g \rightarrow (2 \text{ kg}) = m_f + (0.039 \text{ kg}) \rightarrow m_f = 1.961 \text{ kg}$$

Özgül hacmi  $0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$  olan suyun yoğunluğu ise aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$\rho = 1/v = 1/(0.15 \text{ m}^3/\text{kg}) \rightarrow \rho = 6.67 \text{ kg/m}^3$$

Örnek 3.5 ile verilen benzer  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )- $v$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) diyagramı incelendiğinde soğutma işlemi geçiren sabit özgül hacimdeki su, kızgın buhar bölgesinden ıslak buhar bölgesine doğru ilerlerken doymuş buhar eğrisini de bir noktada kesmektedir. Suyun doymuş buhar eğrisini kestiği bu noktanın sıcaklığı ve basıncı (burada sıcaklık; doyma sıcaklığı ve basınç; doyma basıncı olacaktır), Tablo 6 ve/veya Tablo 7 yardımıyla bulunabilir. Soğutma işlemi doymuş buhar eğrisini kestiği için kesim noktasındaki özgül hacim, doymuş buhar özgül hacmi olacak ve değeri suyun sabit özgül hacmine eşit olacaktır:

$$v_{g, \text{ kesim noktası}} = v = v_1 = v_2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$v = 0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$  değeri, Tablo 6 ve/veya Tablo 7 içinde yer alan  $v_g$  değerleri ile karşılaştırılır ve  $0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$  değerine tam olarak eşit bir değer yoksa interpolasyonla doyma sıcaklığı ve doyma basıncı değerleri aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\frac{195^{\circ}\text{C} - T_{\text{kesim noktası}}}{(195 - 190)^{\circ}\text{C}} = \frac{(0.15 - 0.14089) \text{ m}^3/\text{kg}}{(0.15636 - 0.14089) \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$T_d = T_{\text{kesim noktası}} = 192.06^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{1398.8 \text{ kPa} - P_{\text{kesim noktası}}}{(1398.8 - 1255.2) \text{ kPa}} = \frac{(0.15 - 0.14089) \text{ m}^3/\text{kg}}{(0.15636 - 0.14089) \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$P_d = P_{\text{kesim noktası}} = 1314.24 \text{ kPa}$$

Yukarıdaki değerler Tablo 6 kullanılarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Tablo 7 kullanılarak da belirlenebilir. Kesim noktasına ait doyma sıcaklığı ve doyma basıncı değerleri, hal 1 ve hal 2'ye ait sıcaklık ve basınç değerleri arasında yer almıştır. Hal 1'den hal 2'ye gelen suya ait özgül iç enerji ( $u$ ) ve özgül entropi ( $s$ ) değerleri de benzer şekilde hesaplanabilir. Hesaplanan değerler aşağıda verilmiştir:

$$\text{Hal 1 için: } u_1 = 2937.6 \text{ kJ/kg} \rightarrow s_1 = 7.1127 \text{ kJ/kgK}$$

$$\text{Hal 2 için: } u_2 = 294.0 \text{ kJ/kg} \rightarrow s_2 = 0.9688 \text{ kJ/kgK}$$

Hal 1 ile hal 2 arasındaki özellik değişimleri ise aşağıda verildiği gibi bulunur:

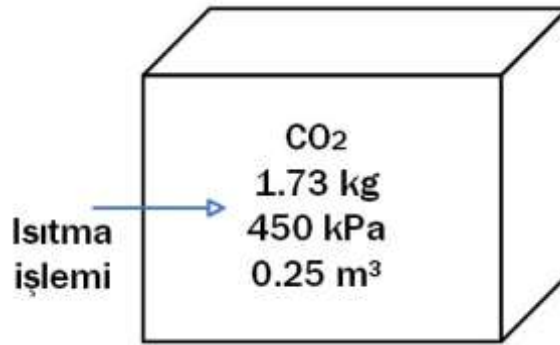
$$\Delta u = u_2 - u_1 = (294.0 - 2937.6) \text{ kJ/kg} = -2643.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (0.9688 - 7.1127) \text{ kJ/kgK} = -6.1439 \text{ kJ/kgK}$$

Kapalı rijit tanktaki suyu soğutmak için gerekli enerji miktarı (sistemden çıkan ısı miktarı) termodinamiğin birinci yasası kapsamında hesaplanabilir. Enerji dengesi eşitliğinden

yararlanarak hesaplanacak ısı çıkışı miktarı “ $m\Delta u$ ” kadar olacaktır. Bu çerçevede soğutma miktarı;  $Q = m\Delta u = (2 \text{ kg})(-2643.6 \text{ kJ/kg}) = -5287.2 \text{ kJ}$  olarak elde edilir. (Buradaki eksi işareti sadece sistemden olan ısı çıkışını –soğutma işlemini- göstermektedir. Sistemden çıkan ısı miktarı;  $Q_{\text{çıkan}} = 5287.2 \text{ kJ}$  olarak da yazılabilir). Özgül entropi değişimi olan  $\Delta s$  değeri de negatif çıkmıştır.

**Soru-Sabit Hacim Problemi:** Şekil ile verildiği gibi, **1.73 kg** kütledeki karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) gazı, **450 kPa** basınç ve **0.25 m<sup>3</sup>** hacmindeki bir kabın içinde yer almaktadır. Kap, basınç **850 kPa** olana kadar ısıtılıyor. Isıtma sonucunda  $\text{CO}_2$  gazında olan sıcaklık değişimini [ $^{\circ}\text{C}$ ] ve [ $\text{K}$ ] olarak hesaplayınız.



**Çözüm** Burada sistem  $\text{CO}_2$  gazıdır. Sabit hacimli kapalı kaba sistem sınırından ısı girişi olduğundan dolayı sistemin sıcaklığında değişim olacaktır. Bu değişim  $\text{CO}_2$  gazı ideal gaz olarak alınarak belirlenecektir.

*Bu soru, sabit hacim-sabit kütle-ısıtma işlemi içeren bir kapalı sistem problemidir.*

**Verilenler**  $\text{CO}_2$  gazının kütlesi:  $m = 1.73 \text{ kg}$   
 $\text{CO}_2$  gazının başlangıçtaki basıncı:  $P_1 = 450 \text{ kPa}$   
 $\text{CO}_2$  gazının hacmi:  $V = 0.25 \text{ m}^3$   
 $\text{CO}_2$  gazının son basıncı:  $P_2 = 850 \text{ kPa}$

**Kabuller** Kabın boyutları (hacmi) basınç ile değişmemektedir.  
 $\text{CO}_2$  ideal gazdır.

**Çözüm**  $\text{CO}_2$  gazının gaz sabiti Tablo 1 yardımıyla  $R = 0.1889 \text{ kJ/kgK}$  olarak alınıp, Denklem (3.12) yardımıyla  $\text{CO}_2$  gazının ilk sıcaklığı aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$P_1V_1 = m_1RT_1 \rightarrow (450 \text{ kPa})(0.25 \text{ m}^3) = (1.73 \text{ kg})(0.1889 \text{ kJ/kgK})T_1 \rightarrow T_1 = 344.25 \text{ K}$$

Denklem (3.11) yardımıyla, hacim sabit olduğu için hal 1 ile hal 2 arasında aşağıda verilen eşitlikler yazılabilir:

$$\left. \begin{array}{l} P_1V_1 = RT_1 \\ P_2V_2 = RT_2 \end{array} \right\} v = v_1 = v_2 \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow \frac{450 \text{ kPa}}{850 \text{ kPa}} = \frac{344.25 \text{ K}}{T_2} \rightarrow T_2 = 650.25 \text{ K}$$

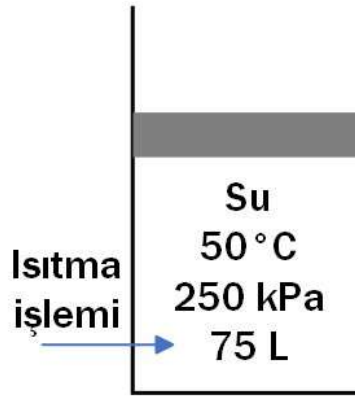
Sisteme olan ısı girişi kapsamında sistemin sıcaklığı 344.25 K (71.10°C) değerinden 650 K (377.10°C) değerine gelmiştir. Bu çerçevede hal 1 ile hal 2 arasında gerçekleşen sıcaklık değişimi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (650.25 - 344.25) \text{ K} = 306 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (377.10 - 71.10) ^\circ\text{C} = 306 ^\circ\text{C}$$

*Isıtma sonucunda CO<sub>2</sub> gazında olan sıcaklık değişimi 306°C ve 306 K olarak belirlenmiştir.*

**Soru-Sabit Basınç Problemi:** Bir piston-silindir düzeneğinde başlangıçta 50°C sıcaklıkta ve 250 kPa basınçta 75 litre (75 L) sıvı su vardır. Piston-silindir düzeneğine ısı girişi oluyor ve sıvının tamamı buharlaşıyor. Bu çerçevede (a) suyun kütlelerini [kg] olarak, (b) suyun son sıcaklığını [K] olarak ve (c) toplam entalpi değişimini [MJ] olarak belirleyiniz.



**Çözüm** Burada sistem piston-silindir düzeneği içindeki sudur. Piston-silindir düzeneğine ait pistonun sabit bir ağırlığı ve piston üzerinde sabit bir atmosfer basıncı vardır. Bu çerçevede piston ve atmosferin oluşturdukları toplam basınç sabittir. Pistonun altında yer alan suyun basıncı da piston ve atmosferin oluşturdukları toplam basınca eşit olacaktır ve dik piston-silindir düzeneği için suyun basıncının yönü yerçekimi ivmesinin tersi yönünde olacaktır. Piston-silindir düzeneği içindeki su soğutuldukça piston sabit basınçta aşağı doğru inecek, ısındıkça ise piston sabit basınçta yukarı doğru çıkacaktır. Bu sorudaki toplam basınç değeri 250 kPa olarak verilmiştir ve bu basınç değeri suyun (sistemin) basıncına da eşit olacaktır.

*Bu soru, sabit basınç-sabit kütle-ısıtma işlemi içeren ve hareketli sınırı olan bir kapalı sistem problemidir.*

**Verilenler** Suyun başlangıçtaki sıcaklığı:  $T_1 = 50^\circ\text{C}$   
Suyun başlangıçtaki basıncı:  $P_1 = 250 \text{ kPa}$   
Suyun başlangıçtaki hacmi:  $V_1 = 75 \text{ litre} = 0.075 \text{ m}^3$

**Kabuller** Dik piston-silindir düzeneğinde toplam basınç sabittir.  
Piston-silindir düzeneği sürtünmesizdir (Sanki-dengeli işlem).

**Çözüm** Hal 1 için sıcaklık ve basınç değerleri verilmiştir. Bu iki değerden yararlanarak hangi bölgede bulunduğu aşağıda verildiği gibi saptanır.

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 50^\circ\text{C} \\ P_1 = 250 \text{ kPa} \end{array} \right\} \text{(Tablo 6)} \rightarrow 50^\circ\text{C} \text{ için} \rightarrow P_d = 12.352 \text{ kPa}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 50^\circ\text{C} \\ P_1 = 250 \text{ kPa} \end{array} \right\} \text{(Tablo 7)} \rightarrow 250 \text{ kPa} \text{ için} \rightarrow T_d = 127.41^\circ\text{C}$$

$P_d < P_1$  veya  $T_1 < T_d$  olduğu için hal 1 sıkıştırılmış sıvı bölgesindedir. Bu iki karşılaştırmadan sadece birine bakmak yeterlidir. Hal 1 için sıkıştırılmış sıvı bölgesine ait özgül hacim ve özgül entalpi değerlerinin saptanması gerekmektedir. Basınç değeri 5 MPa değerinden küçük olduğu için özgül hacim değeri yaklaşık olarak Tablo 6 kullanılarak  $50^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki doymuş sıvının özgül hacim değeri olarak alınacaktır. (Basınç değeri 5 MPa değerinden küçük ise sadece sıcaklık değerine göre Tablo 6 yardımıyla doymuş sıvı özellikleri alınabilir).

$$\text{(Tablo 6)} \rightarrow 50^\circ\text{C} \text{ için} \left\{ \begin{array}{l} v_1 \cong v_f = 0.001012 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_f = 209.34 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Özgül entalpi değeri Denklem (3.10) yardımıyla aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$h_1 \cong h_f + v_f (P_1 - P_{\text{doyma}})$$

$$h_1 \cong (209.34 \text{ kJ/kg}) + (0.001012 \text{ m}^3/\text{kg})(250 - 12.352) \text{ kPa}$$

$$h_1 \cong 209.58 \text{ kJ/kg}$$

Dikkat edilirse  $h_1$  ile  $h_f$  arasında küçük bir fark vardır ve düşük basınçlarda ve  $100^\circ\text{C}$  sıcaklık altında  $h_1 \cong h_f$  olarak alınabilir. Hal 1 için özgül hacim değeri bulunduğu için suyun kütlesi aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.075 \text{ m}^3}{0.001012 \text{ m}^3/\text{kg}} = 74.11 \text{ kg}$$

**(a) Suyun kütlesi 74.11 kg olarak belirlenmiştir.**

Soru içinde verilen “Piston-silindir düzeneğine sistem sınırından ısı girişi oluyor ve sıvının tamamı buharlaşıyor” ifadesi suyun sabit basınçta doymuş buhar noktasına geldiğini göstermektedir. Bu çerçevede suyun son sıcaklığı (hal 2 sıcaklığı), sabit basınçta doyma sıcaklığına eşit olacaktır.

$$P_2 = P_1 = 250 \text{ kPa} \rightarrow \text{(Tablo 7)} \rightarrow T_2 = T_d = 127.41^\circ\text{C} = 400.56 \text{ K}$$

**(b) Suyun son sıcaklığı 400.56 K olarak belirlenmiştir.**

Doymuş buhar noktasına ait özgül entalpi değeri de, Tablo 7 yardımıyla 250 kPa için  $h_2 = h_g = 2716.5 \text{ kJ/kg}$  olarak okunacaktır. Bu kapsamda toplam entalpi değişimi aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

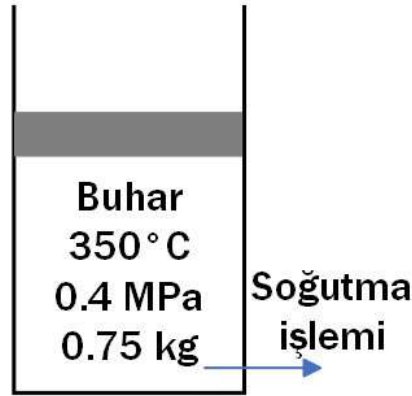
$$\Delta H = m\Delta h = m(h_2 - h_1) \rightarrow \Delta H = (74.11 \text{ kg})[(2716.5 - 209.58) \text{ kJ/kg}]$$

$$\Delta H = 185787.84 \text{ kJ} = 185.79 \text{ MJ}$$

(c) *Toplam entalpi değişimi 185.9 MJ olarak belirlenmiştir.*

**Yorum:** Suyu sabit basınçta hal 1'den hal 2'ye getirebilmek için sisteme  $\Delta H$  kadar ısı girişı olması gerekmektedir. Sistemin hal 2'deki hacmi ise 250 kPa için  $v_2 = v_g = 0.71873 \text{ m}^3/\text{kg}$  olacaktır. Yani ısıtma işleminde sistemin hacmi artacaktır.

**Soru-Sabit Basınç Problemi:** Bir piston-silindir düzeneği  $350^\circ\text{C}$  sıcaklık ve  $0.4 \text{ MPa}$  basınçta  $0.75 \text{ kg}$  buhar içermektedir. Buhar, kütesinin %45 kadarı yoğuşana kadar soğutulmaktadır. (a) son sıcaklığı [ $^\circ\text{C}$ ] olarak ve (b) hacim değişimini [ $\text{m}^3$ ] olarak belirleyiniz.



**Çözüm** Burada sistem dik duran piston-silindir düzeneği içindeki sudur. Soruda yer alan “buhar” ifadesi hem suyu hem de kızgın buharı göstermektedir. Yani kızgın su buharı için kısaca “buhar” ifadesi kullanılabilir. Buharın belli bir oranda yoğuşması demek, doymuş buhar ve doymuş sıvı karışımı elde edilmesi demektir. Su, kızgın buhar bölgesinden ıslak buhar bölgesine doğru sabit basınçta ilerlemekte yani soğutma işlemleri geçirmektedir.

**Bu soru, sabit basınç-sabit kütle-soğutma işlemleri içeren ve hareketli sınırı olan bir kapalı sistem problemidir.**

**Verilenler** Suyun başlangıçtaki sıcaklığı:  $T_1 = 350^\circ\text{C}$   
Suyun başlangıçtaki basıncı:  $P_1 = 0.4 \text{ MPa}$   
Suyun kütle:  $m = 0.75 \text{ kg}$   
Buhar kütesinin yoğuşma oranı: %45

**Kabuller** Dik piston-silindir düzeneğinde toplam basınç sabittir.  
Piston-silindir düzeneği sürtünmesizdir.

**Çözüm** Hal 1 için  $350^\circ\text{C}$  sıcaklık ve  $0.4 \text{ MPa}$  basınç değeri verilmiştir. Soruda buhar ifadesi yer aldığı için hal 1'in kızgın buhar bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır ama yine de hangi bölgede bulunduğu aşağıda verildiği gibi tespit edilebilir:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 350^\circ\text{C} \\ P_1 = 0.4 \text{ MPa} \end{array} \right\} (\text{Tablo 6}) \rightarrow 350^\circ\text{C için} \rightarrow P_d = 16529 \text{ kPa} = 16.529 \text{ MPa}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = 350^\circ\text{C} \\ P_1 = 0.4 \text{ MPa} \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow 0.4 \text{ MPa} = 400 \text{ kPa için} \rightarrow T_d = 143.61^\circ\text{C}$$

$P_d > P_1$  veya  $T_1 > T_d$  olduğu için hal 1 kızgın buhar bölgesindedir. Bu iki karşılaştırmadan sadece birine bakmak yeterlidir. Kızgın buhar tablosu olan Tablo 8 yardımıyla  $P_1 = 0.4 \text{ MPa}$  ve  $T_1 = 350^\circ\text{C}$  için özgül hacim değeri interpolasyonla  $v_1 = 0.71377 \text{ m}^3/\text{kg}$  olarak bulunur. “Buhar, kütlesinin %45 kadarı yoğuşana kadar soğutulmaktadır” ifadesi kapsamında ıslak buhar bölgesine düşüldüğü için kuruluk derecesi 0.55 olarak saptanır. [Toplam kütlenin %45 kadarının yoğuşması demek %45 oranında doymuş sıvı elde etmek demektir. %45 oranında doymuş sıvı varsa %55 oranında doymuş buhar olacaktır. Kuruluk derecesi tanımı doymuş buhar kütlesinin toplam kütleyle oranı olduğundan dolayı, kalite (kuruluk derecesi) %55 olarak elde edilir].

Hal 2 için iki birbirinden bağımsız değişkenden biri basınç değeri, diğeri ise kuruluk derecesi olacaktır:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = P_1 = 0.4 \text{ MPa} \\ x_2 = \%55 = 0.55 \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow 0.4 \text{ MPa} = 400 \text{ kPa için} \left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_d = 143.61^\circ\text{C} \\ v_{f,2} = 0.001084 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg,2} = 0.461336 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{g,2} = 0.46242 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$$

**(a) Son sıcaklık  $143.61^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir.**

Islak buhar bölgesinde bulunduğu için hal 2’ye ait özgül hacim değeri Denklem (3.5) yardımıyla aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

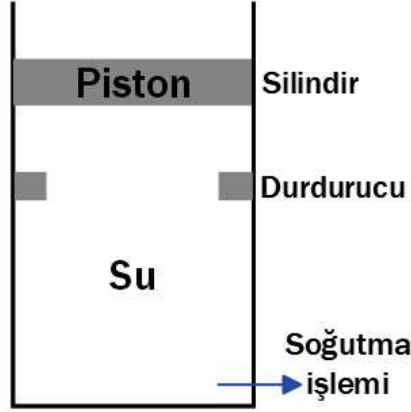
$$\begin{aligned} v_2 &= v_{f,2} + x_2 v_{fg,2} \rightarrow v_2 = (0.001084 \text{ m}^3/\text{kg}) + (0.55)(0.461336 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ v_2 &= 0.25482 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Hal 1 ve hal 2’ye ait özgül hacim değerleri bulunduktan sonra hacim değişimi aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\Delta V = m(v_2 - v_1) = (0.75 \text{ kg})[(0.25482 - 0.71377) \text{ m}^3/\text{kg}] \rightarrow \Delta V = -0.3442 \text{ m}^3$$

Soğutma işlemi çerçevesinde hacim değişiminin işareti “negatif” olmuştur. Yani suyun hacmi azalmıştır.

**Soru-Sabit Hacim/Sabit Basınç Problemi:** Şekil ile verildiği gibi durduruculu bir piston-silindir düzeneğinde başlangıçta **300 kPa** basınç ve **400°C** sıcaklıkta su vardır. Su, doymuş buhar haline gelene kadar piston-silindir düzeneğinden ısı çıkışı olmaktadır. Su doymuş buhar haline geldiğinde piston tam olarak durdurucu üzerine dayanmaktadır (durdurucuya yapışmış olarak durmaktadır). Daha sonra basınç **150 kPa** olana kadar soğutma işlemi devam etmektedir. Bu çerçevede suyun ilk hali ile son hali arasındaki özgül iç enerji değişimini [**kJ/kg**] olarak bulunuz.



**Çözüm 03-09** Burada sistem dik duran piston-silindir düzeneği içindeki sudur. Soruda pistonun ait kütle ve çap değerleri verilmediği için başlangıçtaki toplam basınç 300 kPa olarak alınacaktır. Sürtünmesiz piston başlangıçta durdurucunun üzerinde belli bir yükseklikte temassız olarak durmaktadır. Bu çerçevede soğutma işlemi başlayınca piston sabit basınçta durdurucunun tam üzerine gelip-yapışmış şekilde duracaktır. Bu işlem sabit basınç işlemi olarak ele alınacaktır. Piston durdurucu üzerinde yapışmış olarak durduktan sonra soğutma işlemi devam edecek ve piston aşağıya doğru hareket edemeyeceği için işlem sabit hacim işlemi olarak devam edecektir.

*Bu soru, sabit basınç/değişken hacim-sabit hacim/değişken basınç-sabit kütle-soğutma işlemi içeren ve hareketli sınırı olan bir kapalı sistem problemidir.*

**Verilenler** Suyun başlangıçtaki basıncı:  $P_1 = 300 \text{ kPa}$   
 Suyun başlangıçtaki sıcaklığı:  $T_1 = 400^\circ\text{C}$   
 Suyun son basıncı:  $P_3 = 150 \text{ kPa}$

**Kabul** Piston-silindir düzeneği sürtünmesizdir.

**Çözüm** Başlangıçta piston, durdurucunun üzerinde belli bir yükseklikte durmaktadır ve hal 1 için basınç ve sıcaklık değerleri verilmiştir. (Sistemin basıncı, toplam basınca eşit olacaktır yani pistonun kütlelerinin oluşturduğu basınç ile atmosfer basıncının toplamı, sistemin basıncına eşit olacaktır). Soruda sabit basınçta soğutma işleminde doymuş buhar noktasına erişildiği belirtildiği için hal 1'in kızgın buhar bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır. Yine de hal 1 için hangi bölgede bulunduğu aşağıda verildiği gibi bulunabilir:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 300 \text{ kPa} = 0.3 \text{ MPa} \\ T_1 = 400^\circ\text{C} \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow 300 \text{ kPa için} \rightarrow T_d = 133.52^\circ\text{C}$$

$T_1 > T_d$  olduğu için hal 1 kızgın buhar bölgesindedir. Tablo 8 yardımıyla hal 1 için özgül iç enerji değeri okunabilir:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 300 \text{ kPa} = 0.3 \text{ MPa} \\ T_1 = 400^\circ\text{C} \end{array} \right\} (\text{Tablo 8}) \rightarrow u_1 = 2966.0 \text{ kJ/kg}$$

Kızgın su buharı sabit basınçta doymuş buhar olana kadar soğutuluyor. Bu kapsamda hal 2 için aşağıda verilen özellikler yazılabilir ve Tablo 7 yardımıyla hal 2 için özgül hacim değeri saptanabilir.

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = P_1 = 300 \text{ kPa} \\ x_2 = 1 (\text{doymuş buhar hali}) \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow v_2 = v_{g,2} = 0.60582 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Hal 2 ile hal 3 arasında durdurucudan dolayı sabit hacim işlemi gerçekleşeceği için hal 2'ye ait özgül hacim değeri Tablo 7 yardımıyla okunmuştur. Soğutma işleminin sonunda  $P_3$  basıncına gelinmektedir. Hal 3, doymuş buhar noktasından sabit hacimde aşağıya doğru inildiğinden dolayı ıslak buhar bölgesinde yer alacaktır. Bu durum aşağıda verildiği gibi ispatlanmıştır:

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 150 \text{ kPa} \\ v_3 = v_2 = 0.60582 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow 150 \text{ kPa için } \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_{f,3} = 0.001053 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg,3} = 1.15835 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{g,3} = 1.15940 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$$

$v_{f,3} < v_3 < v_{g,3}$  olduğu için su son durumda ıslak buhar bölgesindedir. Bu çerçevede Denklem (3.5) yardımıyla kuruluk derecesi ve doymuş sıvı ve doymuş buhar hallerine ait özgül iç enerji değerleri aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$v_3 = v_{f,3} + x_3 v_{fg,3} \rightarrow (0.60582 \text{ m}^3/\text{kg}) = (0.001053 \text{ m}^3/\text{kg}) + x_3 (1.15835 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$x_3 = 0.5221 (\%52.21)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 150 \text{ kPa} \\ x_3 = 0.5221 \end{array} \right\} (\text{Tablo 7}) \rightarrow 150 \text{ kPa için } \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_{f,3} = 466.97 \text{ kJ/kg} \\ u_{fg,3} = 2052.3 \text{ kJ/kg} \\ u_{g,3} = 2519.2 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Denklem (3.7) yardımıyla hal 3 için özgül iç enerji değeri aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$u_3 = u_{f,3} + x_3 u_{fg,3} \rightarrow u_3 = (466.97 \text{ kJ/kg}) + (0.5221)(2052.3 \text{ kJ/kg})$$

$$u_3 = 1538.48 \text{ kJ/kg}$$

Hal 3 ile hal 1 arasındaki iç enerji değişimi ise aşağıda verildiği gibi belirlenir:

$$\Delta u = (u_3 - u_1) = (1538.48 \text{ kJ/kg}) - (2966.0 \text{ kJ/kg}) = -1427.52 \text{ kJ/kg}$$

***Suyun ilk hali ile son hali arasındaki iç enerji değişimi -1427.52 kJ/kg olarak belirlenmiştir.***



**Yorum:** Buradaki negatif işareti sadece soğutma işlemi göstermektedir. Yani iç enerjinin azalışı sistemden ısı çıkışı olduğunu göstermektedir ama sistemden olan ısı çıkışının miktarını göstermemektedir. (Sistemden olan ısı çıkışı miktarı 1427.52 kJ/kg değildir).