

Örnek 3.1 Doymuş Sıvı Hali veya Doymuş Sıvı Noktası

Kapalı bir depo içinde 110°C sıcaklıkta $m = 40 \text{ kg}$ kütleinde doymuş sıvı su vardır. Depodaki su için diğer termodinamik özellikleri ve deponun hacmini [m^3] olarak belirleyiniz.

Doymuş sıvı hali, T ($^{\circ}\text{C}$)- v (m^3/kg) ve P (kPa)- v (m^3/kg) diyagramında doymuş sıvı eğrisi üzerinde bir nokta olarak yer alacaktır. Yani doymuş sıvı hali suyun kaynamaya başladığı noktayı gösterecektir. Doyma eğrilerini içeren termodinamik tablolar, Tablo 4 ve Tablo 5 ile verilmiştir. Bu örnekte sıcaklık değeri verildiği için sıcaklığın başta olduğu Tablo 4 kullanılacaktır. Doymuş sıvı haline ait sıcaklık ve basınç özellikleri, doyma sıcaklığı ve doyma basıncı isimlerini alır. Bunun yanında doymuş sıvı hali "f" alt indisi ile gösterilir.

110°C sıcaklık için Tablo 4 kullanılarak doymuş sıvı hali için basınç, özgül hacim, özgül iç enerji, özgül entalpi ve özgül entropi özellikleri aşağıda verildiği gibi okunur:

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow P = P_{\text{doyma}} = 143.38 \text{ kPa}$$

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow v = v_f = 0.001052 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow u = u_f = 461.27 \text{ kJ} / \text{kg}$$

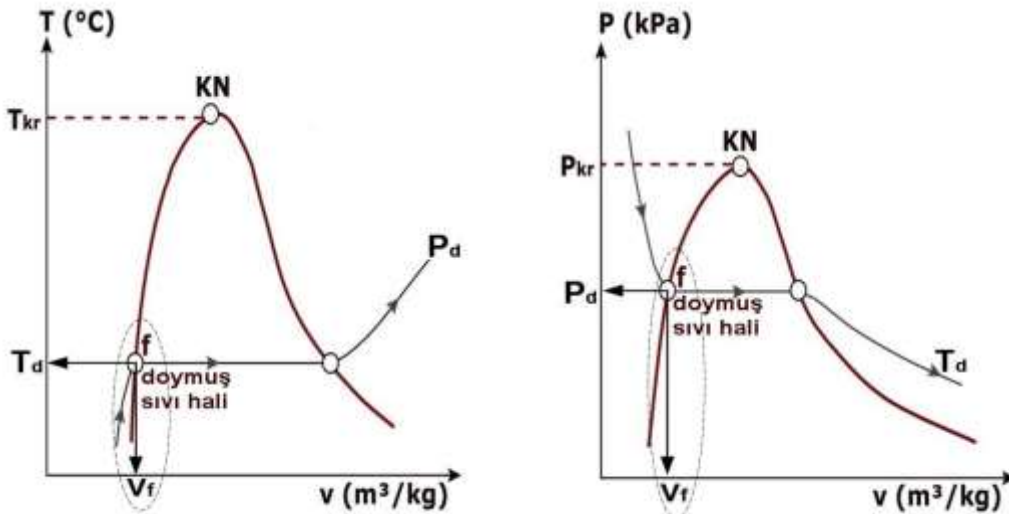
$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow h = h_f = 461.42 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$T = T_d = T_{\text{doyma}} = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow s = s_f = 1.4188 \text{ kJ} / \text{kgK}$$

Deponun hacmi (V) ise aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$V = mv \Rightarrow V_f = m_f v_f = (40 \text{ kg})(0.001052 \text{ m}^3 / \text{kg}) = 0.04208 \text{ m}^3$$

Bu örnek bir hal değişimi ıçermemekte verilen özellik kapsamında sadece bir hale ait bilinmeyen özelliklerin saptanmasını ve hacmin hesaplanmasını ele almaktadır. Bu çerçevede $P_d = 143.38 \text{ kPa}$ doyma basıncı için T ($^{\circ}\text{C}$)- v (m^3/kg) diyagramı ve $T_d = 110^{\circ}\text{C}$ doyma sıcaklığı için P (kPa)- v (m^3/kg) diyagramı aşağıda verildiği gibi çizilebilir. Bu örnekte sadece f noktası ile gösterilen doymuş sıvı halinin özellikleri belirlenmiştir. Şekil üzerinde çizgili elips içinde doymuş sıvı hali (doymuş sıvı noktası) temsili olarak gösterilmiştir. Burada doymuş sıvı noktası, sabit doyma basıncı ve sabit doyma sıcaklığı altında $v_f = 0.001052 \text{ m}^3 / \text{kg}$ olarak verilmiştir.



Örnek 3.2 Doymuş Buhar Hali

Bir piston-silindir düzeneği içinde $V = 0.07 \text{ m}^3$ hacminde doymuş su buharı vardır. Doymuş su buharına ait basınç **350 kPa** olarak ölçülmüştür. Piston-silindir düzeneğinde su için diğer termodinamik özellikleri ve suyun kütlesini [**kg**] olarak belirleyiniz.

Doymuş buhar hali, T ($^{\circ}\text{C}$)- v (m^3/kg) ve P (kPa)- v (m^3/kg) diyagramında doymuş buhar eğrisi üzerinde yer alacaktır. Yani doymuş buhar hali kaynamanın bittiği noktayı gösterecektir. Bu örnekte basınç değeri verildiği için basıncın başta olduğu Tablo 5 kullanılacaktır. Doymuş buhar haline ait basınç ve sıcaklık özellikleri, doyma basıncı ve doyma sıcaklığı isimlerini alır. Bunun yanında doymuş buhar hali “g” alt indisi ile gösterilir.

350 kPa basınç için Tablo 5 kullanılarak doymuş buhar hali için sıcaklık, özgül hacim, özgül iç enerji, özgül entalpi ve özgül entropi özellikleri aşağıda verildiği gibi okunur:

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

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

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow u = u_g = 2548.5 \text{ kJ/kg}$$

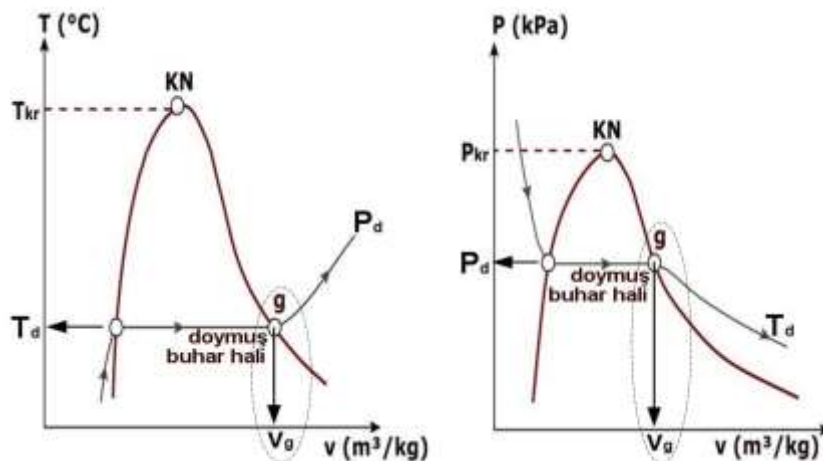
$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow h = h_g = 2732.0 \text{ kJ/kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 350 \text{ kPa} \rightarrow s = s_g = 6.9402 \text{ kJ/kgK}$$

Suyun kütlesi (m) ise aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$m = \frac{V}{v} \Rightarrow m_g = \frac{V_g}{v_g} = \frac{0.07 \text{ m}^3}{0.52422 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.1335 \text{ kg}$$

Bu örnek bir hal değişimi İçermemekte verilen özellik kapsamında sadece bir hale ait bilinmeyen özelliklerin saptanmasını ve kütlenin hesaplanmasını ele almaktadır. Bu çerçevede $T_d = 138.86^{\circ}\text{C}$ doyma sıcaklığı için T ($^{\circ}\text{C}$)- v (m^3/kg) diyagramı ve $P_d = 350 \text{ kPa}$ doyma sıcaklığı için P (kPa)- v (m^3/kg) diyagramı aşağıda verildiği gibi çizilebilir. Bu örnekte sadece g noktası ile gösterilen doymuş sıvı halinin özellikleri belirlenmiştir. Şekil üzerinde çizgili elips içinde doymuş buhar hali (doymuş buhar noktası) temsili olarak gösterilmiştir. Burada doymuş buhar noktası, sabit doyma basıncı ve sabit doyma sıcaklığı altında $v_g = 0.52422 \text{ m}^3/\text{kg}$ olarak verilmiştir.



Örnek 3.3 Buharlaşma

Bir piston-silindir düzeneği içinde **0.35 kg** kütlede su vardır. Su başlangıçta doymuş sıvı halindedir ve **125 kPa** değerindeki sabit basınçta doymuş buhar haline gelene kadar suya ısı girişi olmaktadır. Bu kapsamda, sudaki hacim değişimini [**m³**] olarak ve suya aktarılan enerji miktarını [**kJ**] olarak belirleyiniz.

Piston-silindir düzeneği içindeki suyun toplam sabit basıncı 125 kPa olarak verilmiştir ve sabit basınçta su, doymuş sıvı halinden doymuş buhar haline getirilmektedir. Yani doymuş sıvı su sabit basınçta buharlaştırılmaktadır. (Piston-silindir düzeneğindeki pistonun ağırlığının oluşturduğu basınç ile pistonun üzerindeki atmosfer basıncının toplamı 125 kPa olarak verilmiştir). Buharlaştırma işlemi sırasında birim kütle başına hacim değişimi, doymuş buhar haline ait özgül hacimden doymuş sıvı haline ait özgül hacmin çıkarılması ile bulunur: $v_{fg} = v_g - v_f$ (m^3/kg). Bunun yanında doymuş sıvı hali ve doymuş buhar hali de dahil olmak üzere, doymuş sıvı halinden doymuş buhar haline doğru sabit basınçta ilerken basınç, doyma basıncı ve sıcaklık doyma sıcaklığı ismini alır. Doyma basıncı verildiği için özelliklerin tespiti için basıncın başta olduğu Tablo 5 kullanılmıştır.

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow T = T_{\text{doyma}} = 105.97^\circ\text{C}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow v_f = 0.001048 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow v_g = 1.3750 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow u_f = 444.23 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow u_g = 2513.0 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow h_f = 444.36 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$P = P_d = P_{\text{doyma}} = 125 \text{ kPa} \rightarrow h_g = 2684.9 \text{ kJ} / \text{kg}$$

Sudaki özgül hacim değişimi aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$v_{fg} = v_g - v_f \rightarrow v_{fg} = (1.3750 - 0.001048) \text{ m}^3 / \text{kg} = 1.3740 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

V hacim ve m kütle olmak üzere sudaki hacim değişimi ise aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\Delta V = m(v_g - v_f) = mv_{fg} = (0.35 \text{ kg})(1.3740 \text{ m}^3 / \text{kg}) = 0.4809 \text{ m}^3$$

Bir maddenin birim kütle için buharlaştırmak için gereken enerji miktarı, 125 kPa doyma basıncındaki su için buharlaşma entalpisi eşitliği yardımıyla aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$h_{fg} = h_g - h_f \rightarrow h_{fg} = (2684.9 - 444.36) \text{ kJ} / \text{kg} = 2240.54 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$\Delta H = m(h_g - h_f) = mh_{fg} = (0.35 \text{ kg})(2240.54 \text{ kJ} / \text{kg}) = 784.19 \text{ kJ}$$

Denklem (3.3) ile verildiği gibi entalpi; “ $h = u + Pv$ ” eşitliğinden oluşmaktadır ve buharlaşma entalpisi iç enerji değişimi ve özgül hacim değişimi yardımıyla da aşağıda verildiği gibi belirlenebilir:

$$h = u + Pv \rightarrow \Delta h = \Delta u + P\Delta v + v\Delta P \rightarrow (\text{sabit basınç için } \Delta P = 0 \text{ Pa olur}) \rightarrow \Delta h = \Delta u + P\Delta v$$

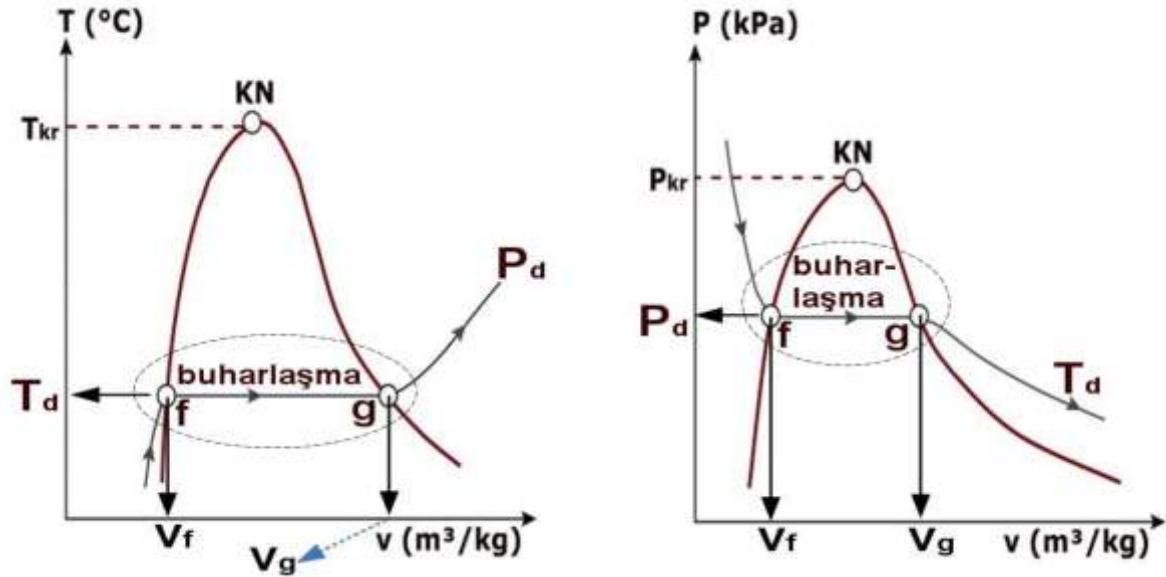
$$\Delta H = m\Delta h = m(\Delta u + P\Delta v) \rightarrow \Delta H = m[(u_g - u_f) + P(v_g - v_f)]$$

$$\Delta H = m[(u_g - u_f) + P(v_g - v_f)]$$

$$\Delta H = (0.35 \text{ kg})[(2513.0 - 444.23) \text{ kJ/kg} + (125 \text{ kPa})(1.3750 - 0.001048) \text{ m}^3/\text{kg}]$$

$$\Delta H = 784.18 \text{ kJ}$$

Bu örnek bir hal değişimi ıçermekte ve bir saf maddeyi doymuş sıvı halinden doymuş buhar haline getirebilmek için verilmesi gereken enerji miktarının hesabını ele almaktadır. Bu çerçevede $T_d = 105.97^\circ\text{C}$ doyma sıcaklığı için T ($^\circ\text{C}$)- v (m^3/kg) diyagramı ve $P_d = 125 \text{ kPa}$ doyma sıcaklığı için P (kPa)- v (m^3/kg) diyagramı aşağıda verildiği gibi çizilebilir. Şekil üzerinde çizgili elips içinde buharlaşma işlemi (doymuş sıvı halinden doymuş buhar haline dönüşme işlemi) temsili olarak gösterilmiştir. Burada buharlaşma işlemi, ıslak buhar bölgesinde sabit doyma basıncı ve sabit doyma sıcaklığı altında $v_f = 0.001048 \text{ m}^3/\text{kg}$ ve $h_f = 444.36 \text{ kJ/kg}$ ile başlamakta ve $v_g = 1.3750 \text{ m}^3/\text{kg}$ ve $h_g = 2684.9 \text{ kJ/kg}$ ile bitmektedir.



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^3] olarak belirleyiniz.

Kapalı kap, sabit hacim ve sabit kütle içeren kapalı bir sistemdir. Bu problemde sistem “su” olarak verilmiştir. Su kütlei, 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 4 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:

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

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

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

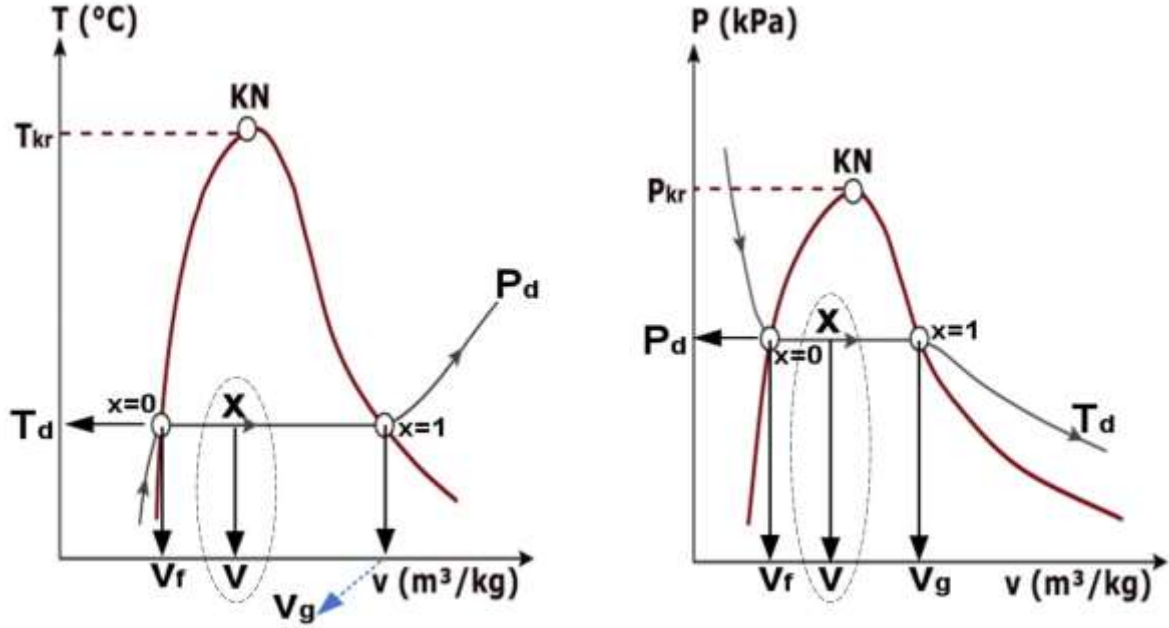
$$V = m v \rightarrow V = (8.9 \text{ kg})(0.4455 \text{ m}^3/\text{kg}) = 3.965 \text{ m}^3$$

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 (m^3/kg) diyagramı ve $P_d = 75.712 \text{ kPa}$ doyma sıcaklığı için P (kPa)- v (m^3/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 $m = 3.8 \text{ kg}$ su vardır. Bu kapsamda suyun sıcaklığını [$^{\circ}\text{C}$] olarak, kalitesini [%] olarak, suyun entalpisini [kJ] olarak ve doymuş buhar halinin kapladığı hacmi [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 5 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 5 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 5 yardımıyla belirlenmesi gerekmektedir. Değerler belirlendikten sonra Denklem (3.8) ile yardımıyla özgül entalpi miktarı hesaplanır:

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

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

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

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

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.