

## 2. SU VE BUHARIN ÖZELLİKLERİ

[\(Ref. e makaleleri\)](#)

### Su Buharı ve Sanayide Kullanımı

Su sabit basınç altında ısıtıldığında kaynayıncaya kadar sıcaklığı yükselir. Buharlaşan suyun sıcaklığı, buharlaşma süresince sabit kalır. Her basınca uygun bir kaynama sıcaklığı vardır; buna "doygunluk sıcaklığı" denir.

Örneğin, 14.7 psi (1 atm.) basınçta suyun doygunluk sıcaklığı 212 °F (100 °C) tır. 14.7 psi ve 70 °F daki su doygun değildir, doygun olabilmesi için 212 °F a kadar ısıtılması gerekir.

Doygunluk sıcaklığında su içermeyen buhara "doygun (saturated) buhar" denir. Susuz ısınmış buhara ısı ilave edilirse sıcaklığı yükselir ve "aşırı doygun (super-heated) veya "kızgın buhar" haline geçer. Aşırı doygun buharın özelliği sıcaklık ve basıncıyla belirtilir. Ancak, doygunluk sıcaklığındaki bir buhar kuru olabilir (susuz) veya az miktarda su içerebilir. Bu gibi ıslak buharı tanımlamak için basıncı ve kalitesi belirtilmelidir;

$$\text{kalite} = \frac{\text{kuru buhar ağırlığı}}{\text{kuru buhar ağırlığı} + \text{su ağırlığı}} \quad \text{şeklinde verilir.}$$

Belirli bir sıcaklıktaki su, bu sıcaklığın karşıladığı basıncın üstünde bir basınçta tutulabilir; örneğin 212 °F daki su, 14.7 psia yerine 200 psia gibi bir basınca getirilebilir. Buna "sıkıştırılmış su" denilmektedir. Sıkıştırılmış suyun bir özelliği, ısı ilavesiyle buharlaşma olmadan sıcaklık yükselmesi sağlanabilmesidir. Sıcaklıktaki yükselme, uygulanan yüksek basınçtaki doygunluk noktasına kadar sürer.

Bir sıvının moleküllerinin sıvı yüzeyini terk ederek gaz haline dönüşebilmesi, bunları sıvı içinde tutan moleküler çekim kuvvetlerinden kurtulmasıyla sağlanır. Gaz fazında moleküller arası mesafe fazla olduğundan çekim kuvvetleri azdır; molekül bir kez kazandığı enerjiyle gaz halini (basınç ve sıcaklık şartları değişmedikçe) korur. Moleküller arasındaki çekim kuvvetlerinin yenilmesi için sıvıya ısı enerjisi şeklinde bir miktar enerji verilmesi gerekir; buna buharlaşma ısı (latent heat) denilmektedir. Buharlaşma ısı bir gram sıvının (veya bir mol, bir pound) buharlaştırılması için gerekli olan ısı miktarıdır.

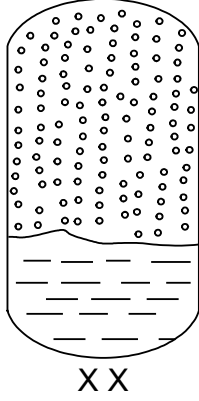
Bütün sıvıların, buldukları basınç ve sıcaklık koşullarında, üzerindeki gaz fazında bir miktar da kendi molekülleri vardır. Koşullar değiştikçe gaz ortamındaki moleküllerin sayısı da değişir; örneğin, basınç sabit tutulup sıcaklık artırıldığında daha çok sıvı molekül gaz faza geçer.

Bu şekilde sıvı ortam üzerinde sabit tutulan p basıncının bir kısmı, gaz ortamına geçmiş sıvı moleküllerince oluşturulur. Sıcaklık arttıkça sıvı üzerindeki gaz moleküllerinin miktarı, dolayısıyla toplam basınç içindeki payları artar. Sıcaklığın yükseltilmesine devam edilirse gaz moleküllerinin toplam basınç içindeki payları artarak nihayet toplam basınca eşit olur; işte bu noktada kaynama başlar. Sıvının buhar basıncının toplam basınca (dış basınca) eşit olduğu noktaya kaynama noktası, bu noktadaki sıcaklığa da kaynama sıcaklığı denir.

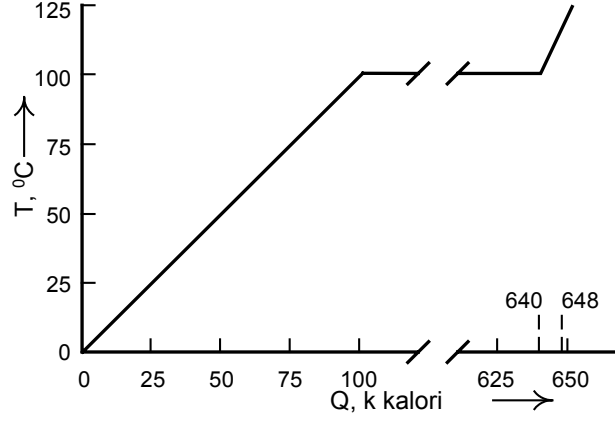
Kaynama noktasına gelinceye kadar verilen enerji sıvının sıcaklığını yükseltmekte kullanılır;bu olayla ilgili hesaplamalarda, o cisme ait ısınma ısısı( $c_p$ ) kullanılır. Kaynama başladıktan sonra ısı verilmeye devam edildiğinde bütün sıvı gaz haline geçinceye kadar sıcaklığı yükselmez.Bu olayla ilgili hesaplamalarda artık  $c_p$  yerine buharlaşma ısısı alınır.

Bütün sıvı gaz haline geçtikten sonra sisteme ısı verilmeye devam edilmesi halinde verilen ısı,gaz haline geçmiş maddenin sıcaklığının yükseltilmesinde harcanır. Bu olayla ilgili hesaplamalarda yine ısınma ısısı ( $c_p$ ) kullanılır. Ancak sıvı halindeki maddenin ısınma ısısı ile aynı maddenin gaz halinin ısınma ısısı birbirlerinden çok farklı değerlerdir.

Kaynama olayının herhangi bir anında maddeye ısı vermeyi kesip sıcaklığı sabit tutarsak kabın içinde birbiri ile dengede iki faz bulunacaktır; sıvı fazda maddenin sıvı hali, gaz fazda aynı maddenin gaz hali vardır.Bu şekilde kendi sıvısı ile denge halinde bulunan buhar doymuş buhardır. Kaynama sona erdikten sonra sisteme ısı verilmeye devam edilirse buharın sıcaklığı yükselir. Sıcaklığı kaynama noktasının üzerinde bulunan ve kendi sıvısı ile denge içinde bulunmayan buhar kızgın buhardır. Sanayide buhar kelimesi, su buharı (steam) anlamındadır, diğer maddelerin buharları için gaz terimi kullanılır. Bir maddenin gaz haline, onun buharı da denilebilir. Sanayide en çok kullanılan enerji kaynağı ve yardımcı madde su buharıdır. Buharında içinde bulunduğu bir grup yardımcı madde (basıncılı hava, kuru hava, soğutma suyu, kullanma suyu, proses suyu, azot gazı, inert gaz, demineralize su gibi) ve enerji kaynağı ile bunların üretildiği tesislere, sanayide "utilite" denilmektedir.



Şekil-1: Sanayide, su ve buharın şematik olarak gösterilmesi.



Şekil-2: Suyun ısıtılmasında sıcaklık-enerji diyagramı.

Şematik diyagramlarda su, kesik küçük çizgilerle, buhar ise ufak daireciklerle gösterilir (Şekil-1). Bir sisteme ısı verilmesi halinde (XX) işareti veya özel şekilde bir ok konulur.

Suyun kaynaması sıcaklık ve verilen ısıya göre izlendiğinde Şekil-2 deki gibi bir T/Q grafiği elde edilir.

X eksenine suya verilen ısı enerjisini (Q), Y eksenine suyun (veya sistemin) sıcaklığını gösterir. Suyun ısınma ısısı 1 dir, yani 1 gram suyun sıcaklığının 1 °C yükseltilmesi için 1 kalori gerekir; grafik eksenlerine değer konulması istendiğinde suyun kütlesi bilinmelidir. Şekil-2'deki T – Q grafiği, 1000 g su için çizilmiştir.

Buharlaştırma olayı sırasında sıcaklık sabit kalırken 1 kg. suya 540 kcal enerji harcanır ve son su damlasının da buhar haline geçmesinden sonra sistemin sıcaklığı yükselmeye başlar. Bundan sonra verilen ısı buharın sıcaklığını yükseltmek için kullanılır; ancak su buharının ısınma ısısı  $c_p = 0.4416 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$  gibi düşük bir değer olduğundan az miktarda enerji buharın sıcaklığını yükseltmeye yeter. Bu nedenle grafikteki eğrinin eğimi dikleşir.

**ÖRNEK**

Sıcaklığı  $0^{\circ}\text{C}$  olan 1 lb suya 80 Btu ısı verilirse suyun sıcaklığı kaç  $^{\circ}\text{C}$  olur? Suyun ısınma ısısı,  $c_p = 4.187 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $1 \text{ Btu} = 1055.1 \text{ J}$ ,  $1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$

**Çözüm:**

$$T_1 = 0^{\circ}\text{C} \quad T_2 = ?^{\circ}\text{C}$$

$$Q = m c_p (\Delta T) = m c_p (T_2 - T_1)$$

$$80 \times 1055.1 \times 10^{-3} = 0.4536 \times 4.187 (T_2 - 0)$$

$$84.408 = 1.899 \times T_2$$

$$T_2 = 44.5^{\circ}\text{C}$$

**ÖRNEK**

$32^{\circ}\text{F}$  sıcaklığında bulunan bir lb suyun kaynama noktasına kadar ısıtılması için kaç kJ enerji verilmesi gerekir?

**Çözüm:**

$$T_1 = 32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C} \quad T_2 = 100^{\circ}\text{C}$$

$$Q = m c_p (\Delta T)$$

$$Q = 0.4536 \times 4.187 (100 - 0)$$

$$Q = 189.92 \text{ kJ}$$

Sanayide okunan ve ölçülen basınçlar sistemlerin mutlak basınçlarını vermezler. Basınç göstergesinde 0 değeri okunması sistemdeki basıncın 0 olduğu anlamına gelmez, sistemin üzerinde normal atmosfer basıncı vardır. Gösterge 1 gösterdiğinde sistemin basıncı normal atmosfer basıncından 1 ölçüm birimi kadar fazladır demektir; yani, basıncı ölçen gösterge birimi atmosfer cinsinden düzenlenmişse ve göstergede 3 atmosfer okunuyorsa sistemin gerçek basıncı  $3 + 1 = 4$  atmosferdir.

Basınç okumalarında bu tip karışıklıkların önlenmesi için okunan değerlerin gösterge değerini yoksa mutlak basınç değeri mi olduğunu belirtmek için basınç biriminin sonuna g (gösterge) veya a (absolut = mutlak) harfleri ilave edilir. Göstergeden 8.5 psi okunuyorsa  $p = 8.5 \text{ psig}$  şeklinde yazılır. Sistemin mutlak basıncı, dönüşüm tablolarından yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

1 atm = 14.696 lb/in (dönüşüm tablolarından)

$p = 8.3 \text{ psig} + 14.696 = 23.196 \text{ psia}$

$p = 23.196 \text{ psia}$ , sistemin psi cinsinden mutlak basıncını gösterir.

Normal atmosfer basıncı altındaki basınçlar negatif gösterge basınçları, eksi basınç gibi ifadeler yerine, "vakum" terimiyle tarif edilir.

Vakum genellikle mm su sütunu veya mm civa sütunu birimi ile verilir. Normal atmosfer basıncı 1033 cm su sütunu veya 760 mm Hg sütunu olduğuna göre, basınç bu değer altında ise vakumdan söz edilir. Örneğin, basınç 600 mm Hg sütunu denildiğinde, sistemde 160 mm Hg basıncına eşit bir vakum vardır; bu durum,  $p = 600 \text{ mm Hg}$  şeklinde gösterilebileceği gibi, vakum = 160 mm Hg şeklinde de ifade edilebilir.

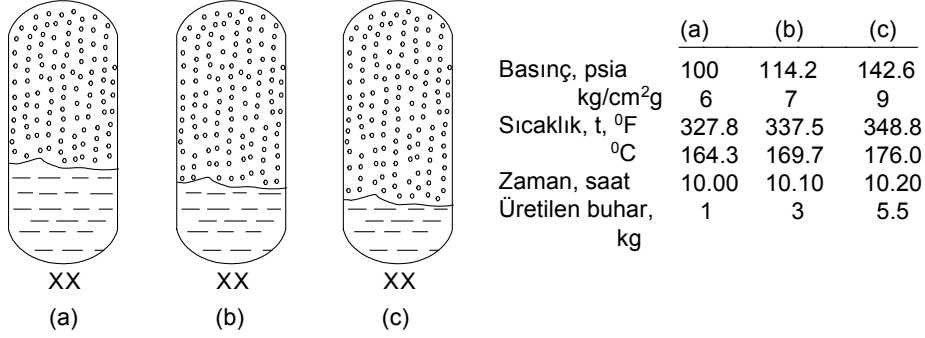
Sanayideki uygulamalarda çoğunlukla gösterge basıncı kullanılır ve doğru olmakla beraber, herhalde çok kullanılıyor olmasından dolayı, basınç değerinden sonra bunun gösterge basıncı olduğu belirtilmez. Mutlak basınçtan söz ediliyorsa, o zaman mutlak işareti olan a harfi konulur. Sanayie yeni katılan elemanlar için terimlerin kullanım eğilimlerinin bilinmesi önemlidir.

Buhar üretilmesi için kaynayan suya ısı ilave edilmesi gerekir; ısının kesilmesi halinde buharlaşma durur. Bu arada ısının bir enerji şekli olduğunun hatırlanmasında yarar vardır. Buhar üretimi, bir sistem içinde sürekli ve amaçlı olarak buhar elde edilmesi işlemidir.

Şekil-3'de kapalı bir kaptaki buhar üretimi gösterilmiştir. Açık kaptaki buhar oluştuğunda buhar içinde bulunduğu ortama (eğer havada bulunuyorsa havaya) dağılır. Kapalı kaptaki buhar miktarı arttıkça kap içindeki basınç yükselir. Şekil-3(a)'da kaynayan suyun üzerindeki basınç  $6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ , sıcaklık  $164,3 \text{ }^\circ\text{C}$  dir; buharın basıncı ve sıcaklığı da aynı değerlerdedir. Buhar basıncı  $6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  dir, çünkü buhar sıcaklığı, kaynama noktasından kaynayan suyun sıcaklığı ile aynıdır.

Burada dikkat edilecek konu, suyun kaynama noktasının  $164,3 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğudur. Görülüyor ki basınç arttıkça kaynama noktası yükselir. Çünkü atmosfer basıncı üzerindeki değerlerde, sıvının buhar basıncının, üzerindeki basınca eşit hale getirilmesi için daha çok enerjiye ihtiyaç vardır; bu ise suya daha fazla enerji verilmesini ve kaynama noktasına gelinceye kadar sıvı sıcaklığının yükselmesine yol açar.

Sıvının üzerindeki basınç arttıkça kaynama noktası da artar. Şekil-3(b)'de 7 kg/cm<sup>2</sup> de ve 3(c) de 9 kg/cm<sup>2</sup> basınç altında buhar üretimleri görülmektedir; bu koşullarda suyun kaynama noktası 169.7 °C ve 176.0 °C ye yükselir. Kaynayan sudan çıkan buharın sıcaklığı doymuluk sıcaklığıdır.



Şekil-3: Kapalı bir kaptaki buhar üretiminde basınç-sıcaklık değişiminin şematik görünümü.

Doymuluk sıcaklığındaki buhara doymuş buhar denilmektedir.

Bir kaptaki buhar üretimi hızı dışarıya doğru olan buhar akış hızından daha fazlaysa, kaptaki buhar basıncı doğal olarak artar.

Endüstride su buharı çok fazla kullanıldığından buhar ile ilgili her türlü fiziksel bilgi detaylı olarak tablolar haline getirilmiştir. Tablolar, endüstride çalışanların kolayca ulaşabilmeleri için ilgili bir çok yayına ek olarak verilir. Konu kolay anlaşılabilmesi için bir örnekle açıklanacaktır.

### ÖRNEK

Kapalı kaptaki bulunan 10 kg suyun sıcaklığı 35 °C, basıncı 1.0 kg/cm<sup>2</sup> g dir. Sisteme ısı verilmeye başlanır. Öncelikle kap içindeki basıncın 5 kg/cm<sup>2</sup> ye yükselmesi beklenir ve sonra kapalı kabın çıkışındaki vana uygun bir şekilde açılarak kap içindeki basınç sabit kalmak üzere 1.0 kg buhar üretimi yapılır. Kaptaki sıvının miktarı 9 kg a düşer.

a. Sistemin basıncı 5 kg/cm<sup>2</sup> g e geldiğinde sıcaklığı ne olur?

b. Bu durumda kapalı kap içindeki sisteme ne kadar enerji verilmiştir?

c. İşlemin sıcaklık-enerji grafiğini çizin.

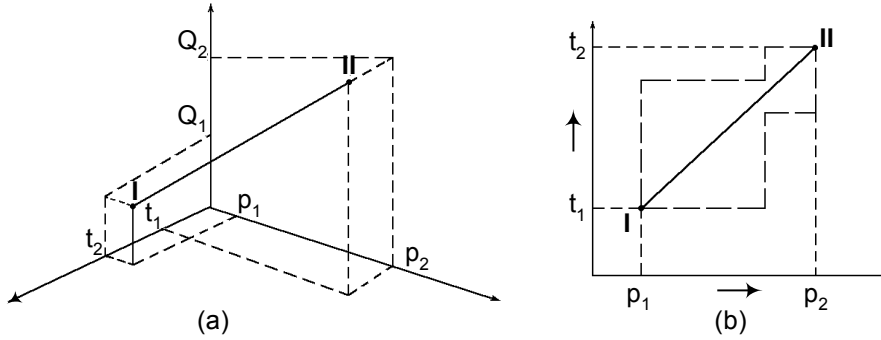
**Çözüm:**

Yapılan işlemler sınıflandırılırsa,

1. ısı verilmeye başlandığında suyun sıcaklığı yükselmeye başlar,
2. su kaynama sıcaklığına gelir ve kaynama olayı başlar,
3. kaynama ile beraber kap içindeki basınç yükselmeye başlar ve kaynama devam ettiği sürece basınç yükselmesi devam eder, buna paralel olarak suyun doymuşluk sıcaklığı yükselir,
4. kap içindeki basınç  $5 \text{ kg/cm}^2$  g e ulaştığında üstündeki vana, kap içindeki su miktarı 9 kg oluncaya kadar açılıp buhar üretimi yapılmış olur.

Bu durumda  $5 \text{ kg/cm}^2$  g basınç altında doymuş basınç üretilmiştir.

Görüldüğü gibi işlemde bir süreklilik, bütünlük, yani bir integrasyon vardır. Bu gibi durumlarda en iyi çözüm matematiksel ifadenin integralinin alınmasıyla olur. Bu bağlantının bilinmediği ve kurulamadığı durumlarda iki nokta arasındaki gelişmeler olabilecek belirli adımlara bölünür; yani integral ile kıyaslandığında  $dt$  veya  $dp$  değişimleri yerine  $\partial t$  ve  $\partial p$  değişimleri kullanılır.



Şekil-4: Problemdeki başlangıç ve bitiş noktalarının (a)  $p - Q - t$  diyagramında, (b)  $p - t$  diyagramında şematik görünüşleri.

Önce iki nokta, yani başlangıç ve bitiş noktaları belirlenir. Maddelerin basınç, sıcaklık, entalpi (enerji miktarları), entropi, hacim bağlantılarını gösteren grafiklere Mollier diyagramları denilir.

Buhar için Mollier diyagramı bu bölüm sonunda verilmiştir. Şekil-4(a)'daki grafik I ve II noktalarının canlandırılması için şematik bir görünümdür.

Sistem I noktasından II noktasına düz kalın çizgi boyunca gider. Ancak p-t eksenli grafikte I ve II noktasına çeşitli yollardan gidilebilir (Şekil-4b).

Problemde iki ayrı yol düşünülebilir.

I. Yol

(A) Adımı: Su  $p_2$  basıncında kaynama noktasına getirilir.

(B) Adımı: Kaynama noktasına getirilmiş sudan  $p_2$  basıncında 1 kg buhar üretilir.

II.Yol

(A) Adımı: Su  $p_1$  basıncında kaynama sıcaklığına kadar ısıtılır.  $T_1$ .

(B) Adımı: Su  $p_1$  basıncında  $T_1$  sıcaklığında buharlaştırılır.

(C) Adımı: Sistemin basıncı  $p_2$  değerine getirilir ve kalan 9 kg suyun sıcaklığı  $p_2$  basıncındaki doymuş buhar sıcaklığına çıkartılır.

(D) Adımı: Buharlaşmış olan 1 kg su buharına  $p_2$  basıncında  $T_2$  sıcaklığına getirilinceye kadar enerji verilir.

Her iki yoldan hesaplamaları yapalım. Sorudaki (a) şıkkı yol ile ilgili olmayıp her iki yol için de II. noktayı tarifler.

a. Sistem  $5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  basınca geldiğinde, bu şartlarda suyla temasta olan buhar, yani  $5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  basınçta doymuş buhar vardır.

$$p_2 = 5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$$

$$p_2 = 5 + 1.033 = 6.033 \text{ kg/cm}^2\text{a}$$

$$p_2 = 6.033 \times 14.22 = 85.79 \text{ psia}$$

Doymuş buharın özellikleri tablosundan 80 ve 90 psia değerlerindeki  $^{\circ}\text{F}$  değerleri okunur ve  $p = 85.79 \text{ psia}$  için T değeri aşağıdaki gibi orontılanarak hesaplanır.



P, psia	T, °F	
80	312.07	tablodan
90	320.31	tablodan

$$T_2 = \frac{320.31 - 312.07}{10} \times 5.79 + 312.07 = 316.9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_2 = (316.9 - 32) / 1.8 = 158.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**b. 1. Yol**

(A) Adımı:  $p_2$  basıncında kaynama noktasında bulunan suyun sıcaklığı,

$$T_2 = 158.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$c_p = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$  olduğu kabulüyle,

$$Q = m c_p (\Delta t)$$

$$Q_1 = 10.1 (158.28 - 35) = 1232.8 \text{ kcal}$$

(B) Adımı:  $p_2$  ve  $T_2$  şartlarında bulunan sudan 1 kg buhar üretilmesi.

Buharlaşma ısıları, tablolarda doğrudan okunabileceği gibi suyun ve buharın enerji seviyeleri farklarından da bulunabilir.

$$p_2 = 5 \text{ kg/cm}^2\text{g} = 85.79 \text{ psia} \quad T_2 = 158.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Buharın termodinamik özelliklerini gösteren tablolardan,

$h_f$  = doygun sıvının spesifik entalpisi, Btu/lb<sub>m</sub>

$h_g$  = doygun buharın spesifik entalpisi, Btu/lb<sub>m</sub>

p, psia	$h_f$ , Btu/lb <sub>m</sub>	$h_g$ , Btu/lb <sub>m</sub>	$h_{fg}$ , Btu/lb <sub>m</sub>	
80	282.21	1183.6	901.4	tablo-5
90	290.76	1185.9	895.1	tablo-5
85.79	287.16	1184.9	897.7	hesapla

Buharlaşma ısı  $h_v = 897.7 \text{ Btu/lb}$  bulunur.

Buharlaşma enerjisi

$$897.7 \text{ Btu/lb} \times 0.252 \times \frac{1}{0.4536} = 498.7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_2 = 1 \text{ kg} \times 498.7 \text{ kcal/kg} = 498.7 \text{ kcal}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1232.8 + 498.7 = 1731.5 \text{ kcal}$$

## 2. Yol

(A) Adımı: Su  $T_1$  sıcaklığından  $T'_1$  sıcaklığına ısıtılır.

$$p = 1 \text{ kg/cm}^2\text{g} = 2.033 \text{ kg/cm}^2\text{a} = 28.91 \text{ psia}$$

$$T'_1 = 248.10 \text{ }^\circ\text{F} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 10 \times 1 \times (120 - 35) \text{ kg} \times (\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}) = 850.5 \text{ kcal}$$

(B) Adımı:  $t'_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C} = 248.10 \text{ }^\circ\text{F}$ da buharlaşma enerjisi.

$$h_v = 946.5 \text{ Btu/lb} = 946.4 \times 0.252 \times (1/0.453) = 526.53 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_2 = 1 \text{ kg} \times 526.3 \text{ kcal/kg} = 526.53 \text{ kcal}$$

(C) Adımı: 9 kg suyun sıcaklığı  $T'_1$ den  $T_2$  ye getirilir.

$$Q_3 = 9 \text{ kg} \times 1 (\text{kcal/kcal } ^\circ\text{C}) (158.28 - 120) \text{ }^\circ\text{C} = 344.52 \text{ kcal}$$

(D) Adımı : 1 kg buhar sabit hacim altında  $T'_1$  den  $T'_2$  ye ısıtılır.

$$c_p = 0.4416 \text{ kcal/kg} = 0.4416/1.667 = 0.2649$$

$$Q_4 = 1 \times 0.2649 \times (158.28 - 120) = 10.14$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 850.5 + 526.53 + 344.52 + 10.14 = 1731.26 \text{ kcal}$$

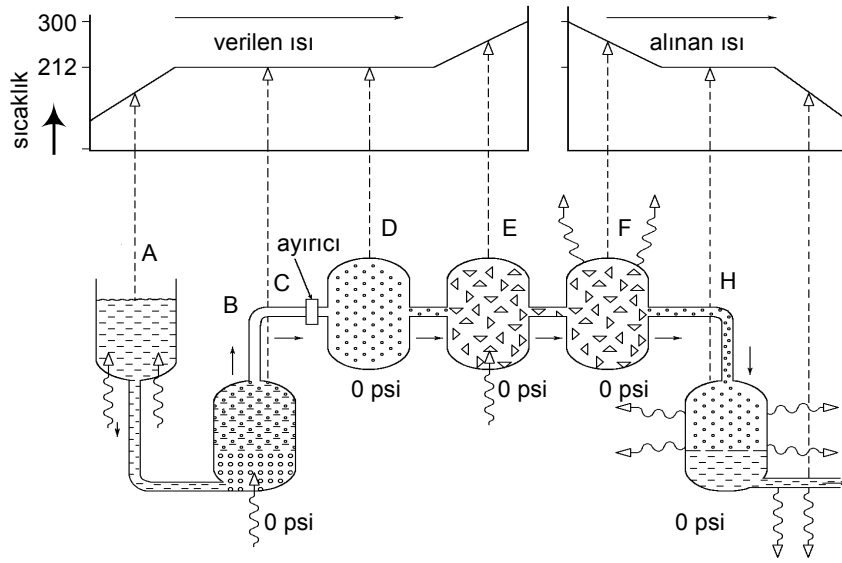
Görüldüğü gibi iki ayrı yoldan hareket edilerek yapılan hesaplamalarda verilmesi gerekli olan ısı miktarı, çok az hata ile (on binde 1.4) aynı bulunmuştur.

Bu noktada problemin verilisinde özellikle yer alan bir çelişkiyi göz önüne getirelim. Problemden suyun sıcaklığının  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğu ve basıncının  $p_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$  olduğu belirtilmiştir. Tablolara bakıldığında  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta suyun buhar basıncının  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0.8237 \text{ psia}$  olduğu görülür. Bu durumda ortamda basıncı oluşturan başka bir gazın bulunması gerekmektedir. Bu gazın Azot gazı olduğunu kabul edelim. Azot gazının kısmi basıncı Dalton kanunundan bulunur.

$$p = 14.22 + 14.696 = 28.916 \text{ psia}$$

$$p_{\text{N}_2} = 28.916 - 0.8237 = 28.63 \text{ psia}$$

c. Doymuş buhar ısıtıldığında sıcaklığı yükselir ve sıvı ile dengede olmadığından kızgın buhara dönüşür. Doymuş buhardan ısı alınmaya başlandığı andan itibaren buhar da yoğunlaşmaya başlar. Kızgın buhardan ısı veya ısıya eşdeğer bir enerji (mekanik enerji) alınmaya başlandığında kızgın buharın sadece sıcaklığı düşmeye başlar. Şekil-5'de işlemin sıcaklık-ısı (veya enerji) eğrisi görülmektedir.



Şekil-5: Örnek problemin şematik anlatımı

Eğrinin gidişinden, aşağıdaki sorular kolaylıkla cevaplandırılabilir:

- Doymuş buharın basıncı arttıkça sıcaklığı ne olur?
- Doymuş buharın basıncı artarken sıcaklığı değiştirilmezse ne olur?
- Basıncı arttıkça suyun kaynama noktası neden değişir?
- Kaynama noktasına ulaştıktan sonra verilen enerji nerede kullanılır?
- Su için ısınma ısı ve buharlaşma ısını mukayese edin, basıncı arttıkça suyun buharlaşma ısı nasıl değişir?
- Buharlaşma ısı değişimiyle kaynama sıcaklığı değişimini kıyaslayınız.

### Buhar Tabloları ve Mollier Grafiğinin Kullanılması

Su ve buharın çeşitli özelliklerini gösteren değerler deneysel çalışmalarla saptanarak tablolarda ve grafiklerde toplanmıştır. Doymun su-sıcaklık, doymun su - basınç ve kızgın buhar tabloları, SI ve US birimleriyle bu bölümün sonunda verilmiştir.

Islak buharın kalitesi bilindiğinde, buhar tablolarından entalpi ve entropisi hesaplanabilir. Örneğin, X kalitesindeki bir pound ıslak buharı X kg doymun buhar ve (1 - X) kg doymun su bulunur. Suyun entalpisi  $h_f$  ve buharın entalpisi  $h_g$  tablolardan okunur. Karışımın entalpisi aşağıdaki eşitliklerden elde edilir.

$$h = X h_g + (1 - X) h_f = X h_g + h_f - X h_f = h_f + X (h_g - h_f)$$

$$h_{fg} = h_g - h_f = \text{aynı sıcaklıktaki doymun buhar ve suyun entalpileri farkıdır.}$$

$$h = h_f + X h_{fg} \quad (1)$$

### ÖRNEK

%95 lik 100 psia basınçlı buharın entalpisini,

a. SI birimleriyle,

b. US birimleriyle hesaplayınız.

Sonuçları kıyaslayınız. (100 psia = 689476 Pa  $\cong$  0.7 Mpa, Btu/lb<sub>m</sub> = 2.326 kJ/kg)

### Çözüm:

a.

Basınç., MPa	$h_f$ , kJ/kg	$h_g$ , kJ/kg	$h_{fg}$ , kJ/kg	
0.6	670.6	2756.8	2086.2	tablo-2
0.8	721.1	2769.1	2048	tablo-2
0.7	695.8	2763	2058.1	hesapla

$$h = h_f + X h_{fg} \quad X = \%95$$

$$h = 695.8 + 0.95 \times 2058.1 = 2650.9 \text{ kJ/kg}$$

b.

Basınç, psia	$h_f$ , Btu/lb <sub>m</sub>	$h_g$ , Btu/lb <sub>m</sub>	$h_{fg}$ , Btu/lb <sub>m</sub>	
100	298.61	1187.8	889.2	tablo-5

$$h = h_f + X h_{fg} \quad X = \%95$$

$$h = 298.61 + 0.95 \times 889.2 = 1143.3 \text{ Btu/lb}$$

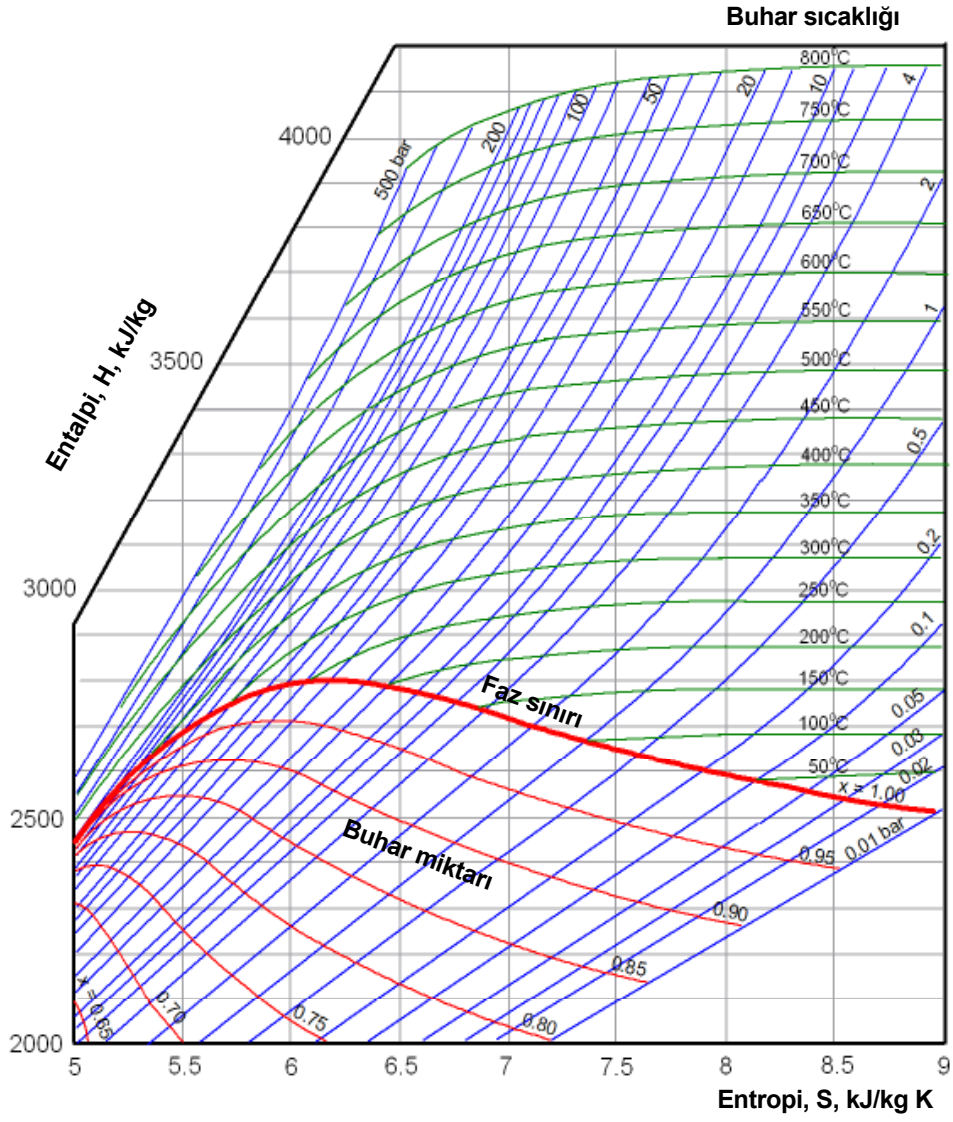
Sonuçların kıyaslanması:

a. kısmından,  $h = 2651 \text{ kJ/kg}$

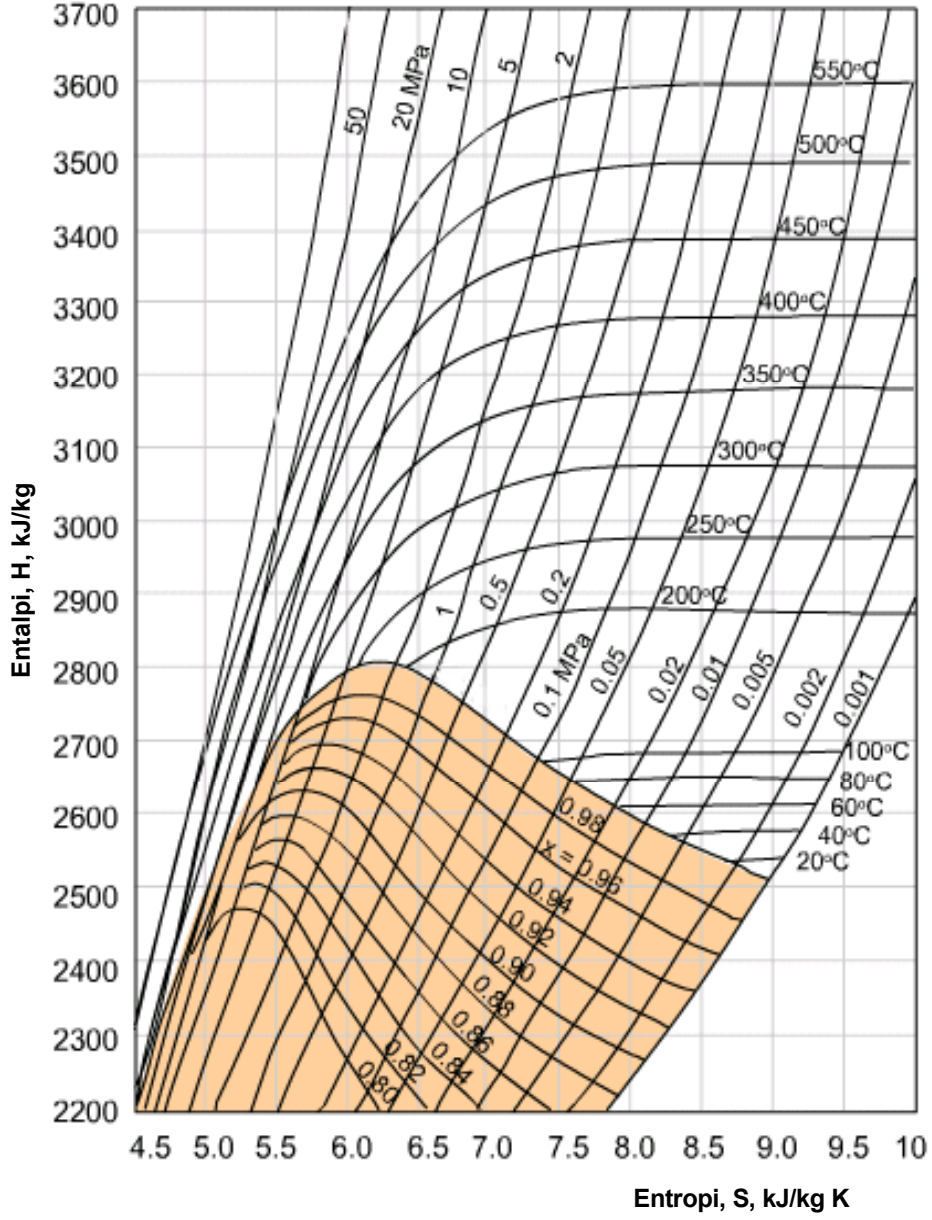
b. kısmından,  $h = 1143.3 \text{ Btu/lb} \times 2.326 = 2659 \text{ kJ/kg}$

Buhar verileri grafiklerle de gösterilebilir. Bu konuda hazırlanmış çok çeşitli grafikler vardır, fakat en fazla kullanılanı entalpi-entropi (veya Mollier) diyagramıdır. Şekil-6 (a), (b), (c), (d)'de çeşitli amaçlı Mollier diyagramları görülmektedir.

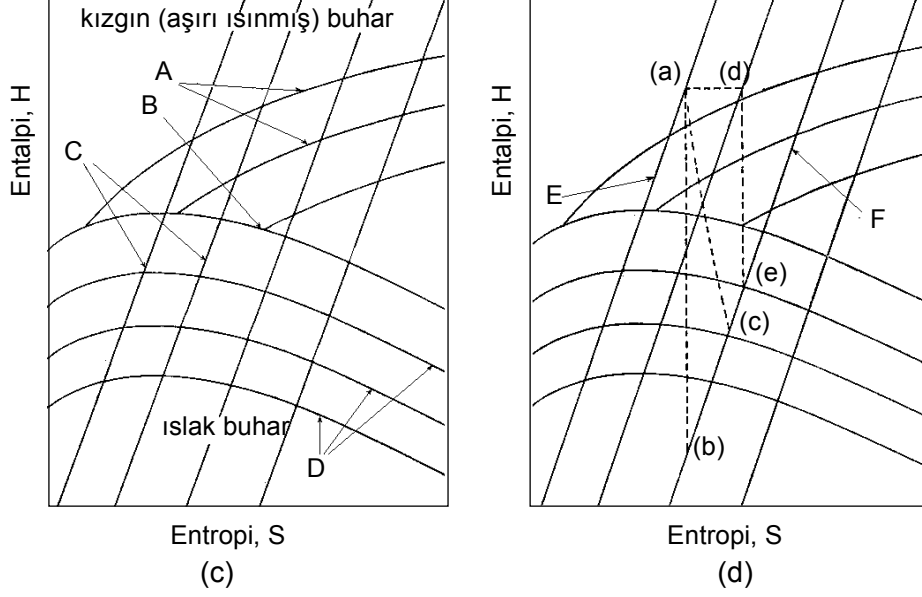
Doymuş buharın entalpi ve entropisi, doymuş-buhar hattı ile basınç hattının kesim noktasından bulunur. Aşırı doymuş buharın entalpi ve entropisi, aşırı doymuş buharın sıcaklık ve basıncını tanımlayan hatların kesiştikleri noktadan, ıslak buharın basıncı ve kalitesi bilindiğinde ise, basınç ve kalite hatlarının kesim noktasından bulunur.



Şekil-6(a): Buhar için Mollier diyagramı, metrik sistem,  $P = \text{bar}$



Şekil-6(b): Buhar için Mollier diyagramı, metrik sistem,  $P = \text{Mpa}$



Şekil-6(c): Buhar için Mollier diyagramı (basit görünüm), (d): türbin genişleme hatlarını gösteren Mollier diyagramı; A: sabit sıcaklık hatları, B: doyun buhar hattı, C: sabit basınç hatları, D: sabit kalite hatları, E: giriş basınç hattı, F: çıkış basınç hattı