

II. SAF MADDENİN ÖZELLİKLERİ

2.1 Saf Madde

Her noktasında aynı ve değişmeyen bir kimyasal bileşime sahip maddeye **saf madde** adı verilir.

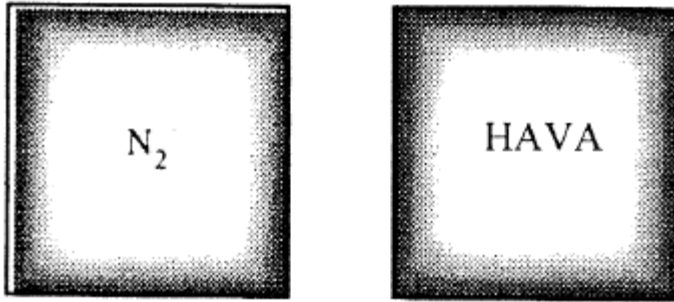
Örnek: Su, azot, helyum, karbondioksit

Saf maddenin sadece bir tek kimyasal element veya bileşimden oluşması gerekmez. Değişik kimyasal elementlerden oluşan bir karışımda, düzgün dağılı (homojen) olduğu sürece saf madde tanımına uyar. Örnek olarak hava değişik gazlardan oluşan bir karışımdır, kimyasal bileşimi her noktada aynı ve değişmez olduğu için saf maddedir. Buna karşılık su ve yağ karışımı saf bir madde sayılamaz, çünkü böyle bir karışımda, yağ suda çözülmeyp üstte toplandığından, kimyasal olarak birbirine benzemeyen iki ayrı bölge oluşur.

2.1 Saf Madde

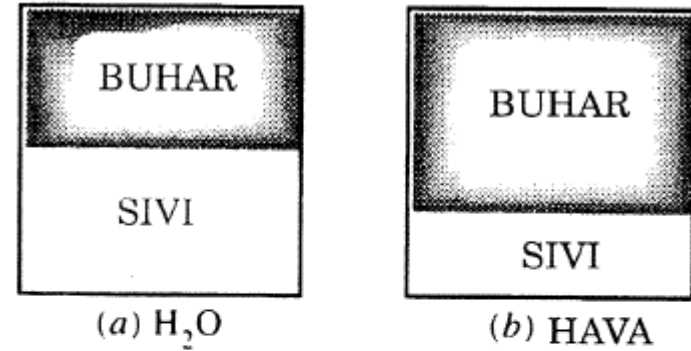
Saf bir maddenin iki veya daha çok fazının bir arada bulunduğu bir karışım da, fazların kimyasal bileşiminde bir farklılık olmadığı sürece saf madde kapsamına girer. Örneğin sıvı su ve buz karışımı saf madde kapsamına girer, çünkü her iki fazın da kimyasal bileşimi aynıdır. Buna karşılık sıvı hava ile gaz havanın oluşturduğu karışım saf bir madde değildir, çünkü sıvı havanın kimyasal bileşimi gaz havakininden farklıdır. Bunun nedeni, havayı oluşturan gazların değişik yoğunlaşma sıcaklıklarına sahip olmalarıdır.

2.1 Saf Madde



ŞEKİL 2-1

Azot ve gaz hava birer saf maddedir.



ŞEKİL 2-2

Sıvı buhar karışımı su saf bir maddedir, fakat sıvı ve gaz havanın karışımı saf bir madde değildir.

2.1 Saf Maddenin Fazları

Faz, fiziksel olarak belirgin sınırlar içinde her noktada aynı olan belirli bir molekül düzenini simgeler.

Temelde **katı, sıvı ve gaz** olmak üzere üç faz vardır. Fakat her temel faz içinde farklı molekül düzenine sahip başka fazlar da olabilir. Örnek olarak karbon, katı faz içinde grafit veya elmas fazlarında bulunabilir. Helyumun iki sıvı fazı, demirin üç katı fazı vardır. Yüksek basınçlarda buz yedi değişik fazda bulunabilir.

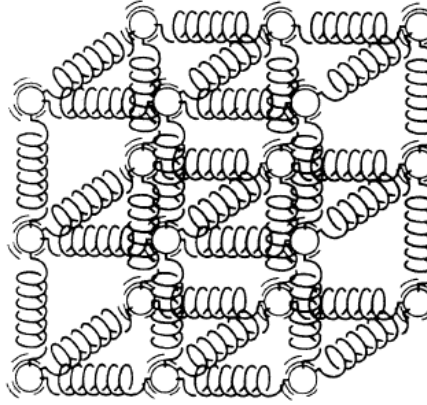
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Saf maddenin iki fazının bir arada bulunduğu durumlarla uygulamada sık sık karşılaşılır. Su, bir kazanda veya buharlı g santralinin yoğuşturucusunda sıvı buhar karışımı olarak bulunur. Buzdolabının dondurucusunda soğutucu akışkan, sıvıdan buhara dnşr.

Temel kavram ve ilkeler, en bilinen akışkan olan su üzerinde açıklanacaktır. Tüm saf maddelerin aynı genel davranışı gösterdiğini vurgulamak yerinde olur.

2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Katı fazında moleküller latis adı verilen ve kendini tekrarlayan üç boyutlu bir düzende yer alırlar (Şekil 2-3). Katı cisim içindeki moleküller birbirlerine yakın olduklarından, onları birbirine çeken kuvvetler güçlüdür ve bu nedenle moleküller yerlerinde sabit kalırlar (Şekil 2-4).



ŞEKİL 2-3

Katı bir cismi oluşturan moleküller, yay benzeri moleküller arası kuvvetlerle yerlerinde tutulurlar.

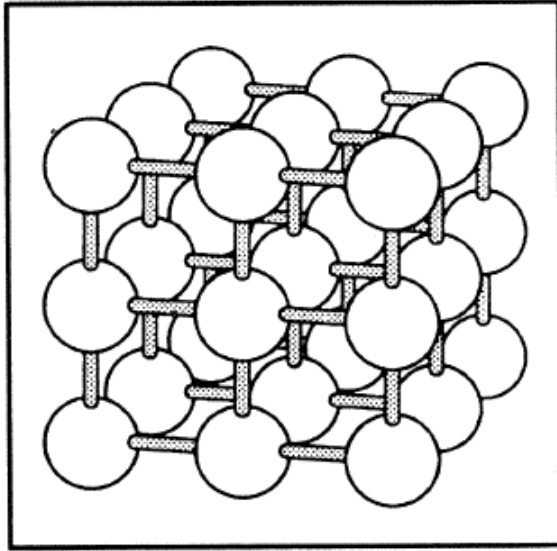
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Sıvı fazında moleküllerin arasındaki mesafe katı fazına oranla çok farklı değildir, fakat moleküller artık yerlerinde sabit kalmak yerine kümeler halinde birbirlerinin üzerinden kayarlar. Bununla birlikte, her küme içindeki yapısal düzen bozulmaz ve moleküller birbirlerine göre yerlerini korurlar. Moleküller arasındaki mesafe madde katıdan sıvıya dönüşürken biraz artar, bunun tersi çok az madde için geçerlidir, su bu tür maddelerden biridir.

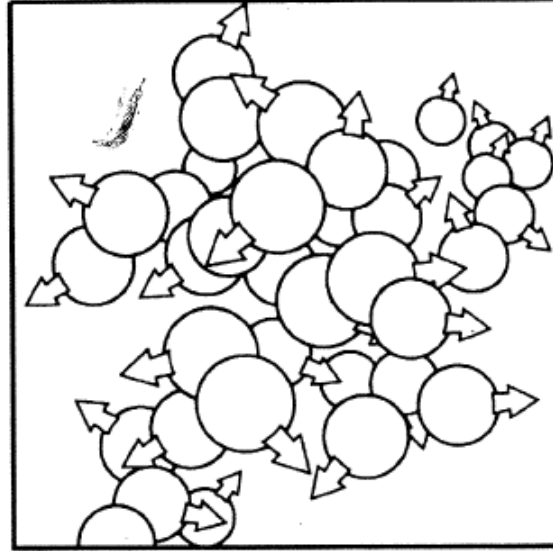
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Gaz fazında moleküller birbirlerinden iyice uzaklaşmışlardır ve yapısal bir düzenden söz edilemez. Gaz molekülleri rastgele bir hareket içindedir ve sürekli olarak birbirleriyle ve içinde bulundukları kabın cidarlarıyla çarpışırlar. Özellikle düşük yoğunluklarda, moleküller arasındaki kuvvetler çok küçüktür ve moleküller arasındaki çarpışmalar tek etkileşim yoludur. Gaz fazındaki moleküllerin enerji düzeyleri sıvı ve katı fazındakilere oranla oldukça yüksektir. Bu nedenle bir gaz yoğuşurken veya donarken çevreye büyük miktarlarda enerji vermek durumundadır.

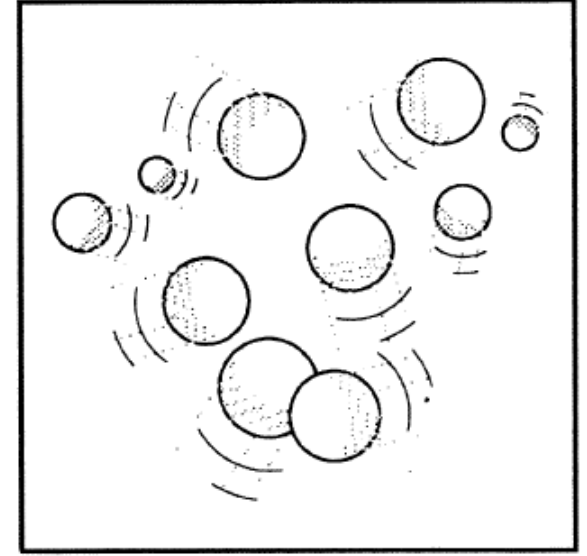
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri



(a)



(b)



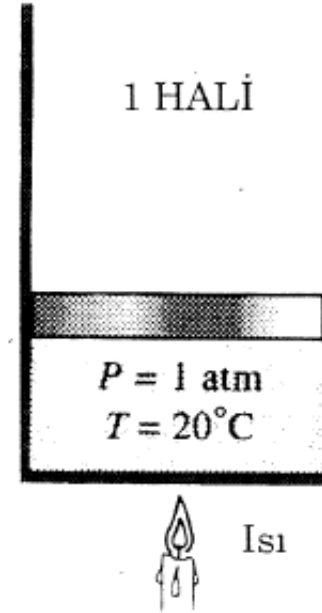
(c)

ŞEKİL 2-5

Moleküllerin değişik fazlardaki düzeni: (a) Katı fazında moleküller yerlerinde hemen hemen sabittir, (b) Sıvı fazında molekül kümeleri birbirlerinin üzerinden akarlar, (c) gaz fazında moleküller rastgele bir hareket içindedir.

2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

İçinde 20°C sıcaklık ve 1 atm basınçta su bulunan bir piston-silindir düzenneğini ele alalım. Bu koşullarda su sıvı fazındadır ve **sıkıştırılmış sıvı** veya **soğutulmuş sıvı** olarak adlandırılır. Bu terimler suyun henüz buharlaşma aşamasına gelmediğini belirtir.

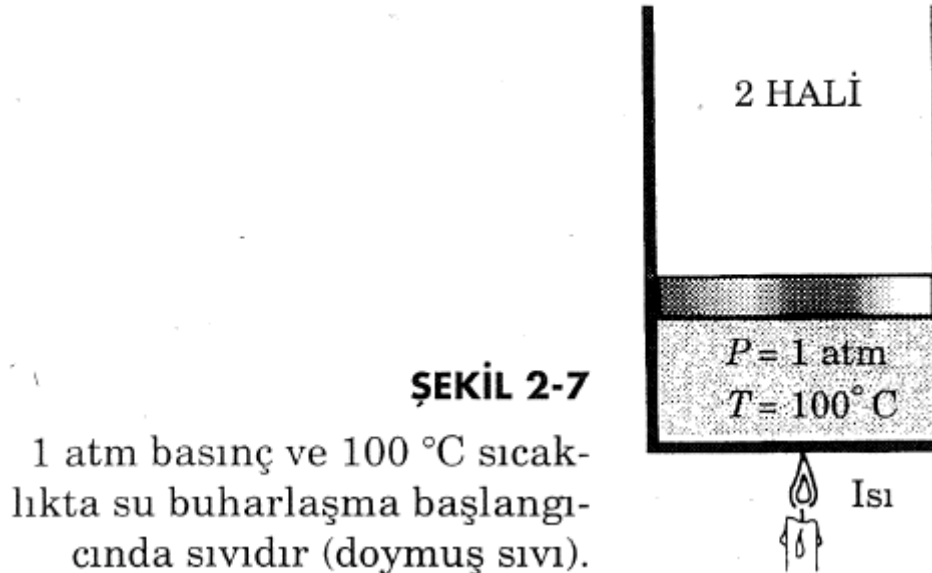


ŞEKİL 2-6

1 atm basınç ve 20 °C sıcaklıkta su sıvı fazındadır (sıkıştırılmış sıvı).

2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Suyun ısıtılması sürdürülürse sıcaklıktaki artış 100°C olana kadar sürecektir. Bu noktada su hala sıvıdır, fakat bu noktadan sonra en ufak bir ısı geçişi bile bir miktar sıvının buhara dönüşmesine yol açacaktır. Buharlaşma başlangıcı olan bu hal, **doymuş sıvı** hali diye bilinir.



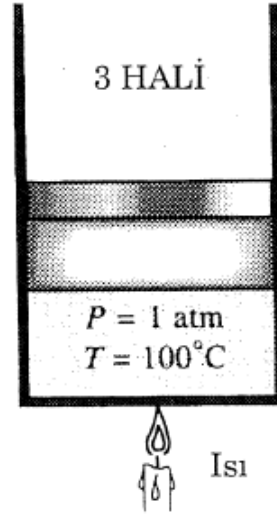
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Buharlaşma başladıktan sonra, sıvının tümü buhara dönüşünceye kadar sıcaklıkta bir artış olmayacaktır. Başka bir deyişle, faz değişimini içeren hal değişiminin tamamı süresince sıcaklık sabit kalacaktır.

Bu işlemler sırasında basıncın da değişmediğini bir kez daha önemle belirtelim.

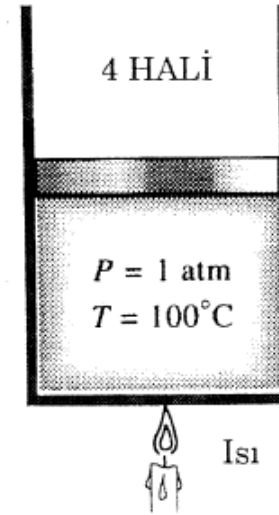
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Buharlaşma sürecinin ortalarında silindirin içinde yarı yarıya sıvı ve buhar olacaktır. Isıtma işlemi srdrlrse, tüm sıvı buhara dönüşür.



şEKİL 2-8

Isıtma sürdürüldüğünde doymuş sıvının bir bölümü buharlaşır (doymuş sıvı buhar karışımı).

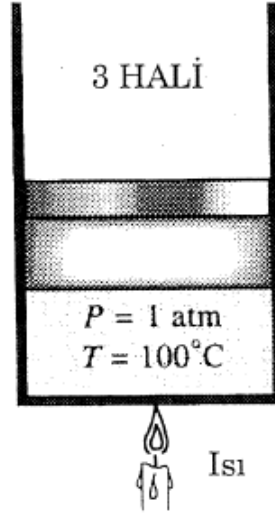


şEKİL 2-9

1 atm basınçta, sıvının son damlası da buharlaşana kadar, sıcaklık 100°C 'da sabit kalır (doymuş buhar).

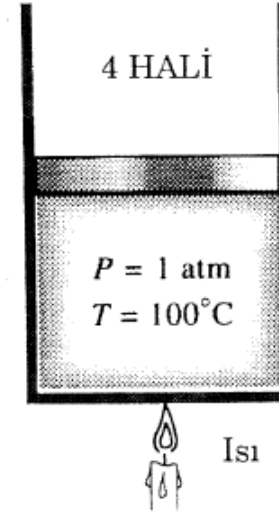
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Bu noktada silindirin içi yoğuşmanın sınırında olan buharla doludur. Buhardan evreye az da olsa ısı geçişi bir miktar buharın yoğuşmasına yol açacaktır.



ŞEKİL 2-8

Isıtma sürdürüldüğünde doymuş sıvının bir bölümü buharlaşır (doymuş sıvı buhar karışımı).

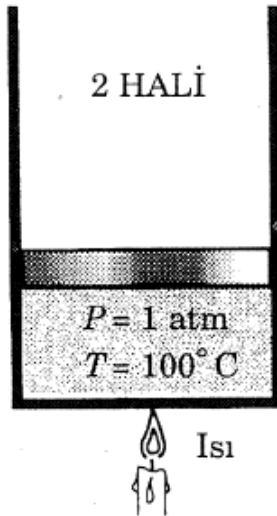


ŞEKİL 2-9

1 atm basınçta, sıvının son damlası da buharlaşana kadar, sıcaklık 100°C 'da sabit kalır (doymuş buhar).

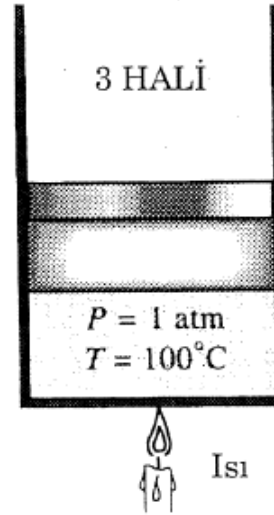
2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

Yoğuşmanın sınırında olan buhara **doymuş buhar** adı verilir. 2 ile 4 halleri arasında bulunan bir madde doymuş sıvı-buhar karışımı diye bilinir, çünkü aradaki hallerde sıvı ve buhar fazları bir arada ve dengede bulunur.



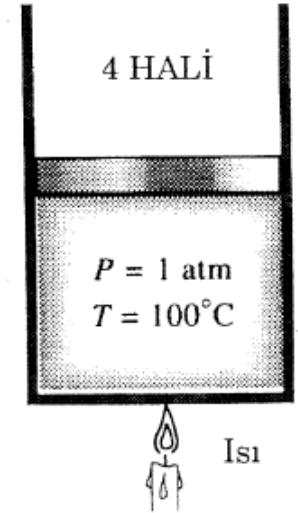
şEKİL 2-7

1 atm basınç ve 100°C sıcaklıkta su buharlaşma başlangıcında sıvıdır (doymuş sıvı).



şEKİL 2-8

Isıtma sürdürüldüğünde doymuş sıvının bir bölümü buharlaşır (doymuş sıvı buhar karışımı).

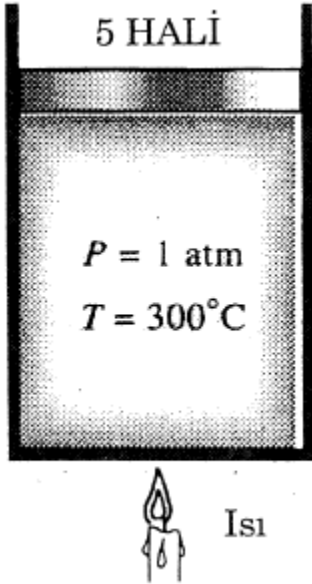


şEKİL 2-9

1 atm basınçta, sıvının son damlası da buharlaşana kadar, sıcaklık 100°C 'da sabit kalır (doymuş buhar).

2.2 Saf Maddelerin Faz Değiştirdikleri Hal Değişimleri

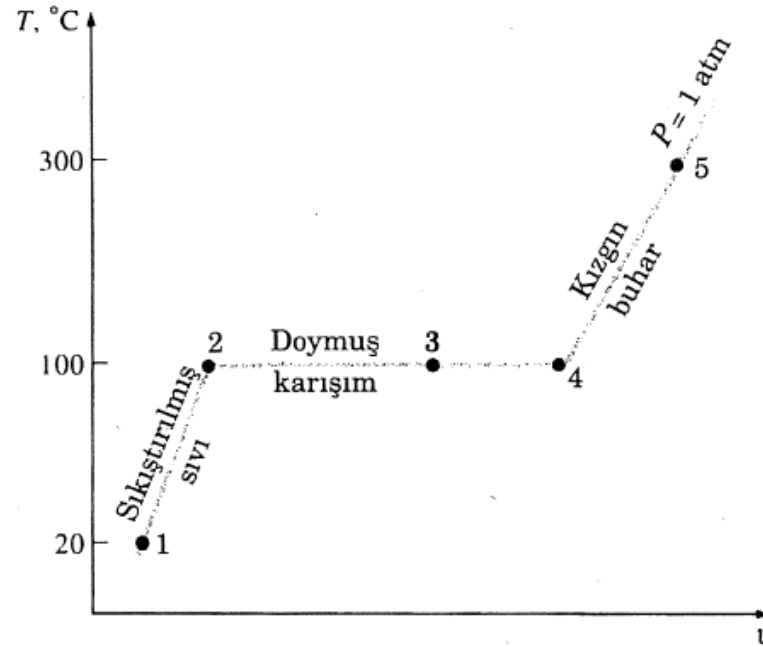
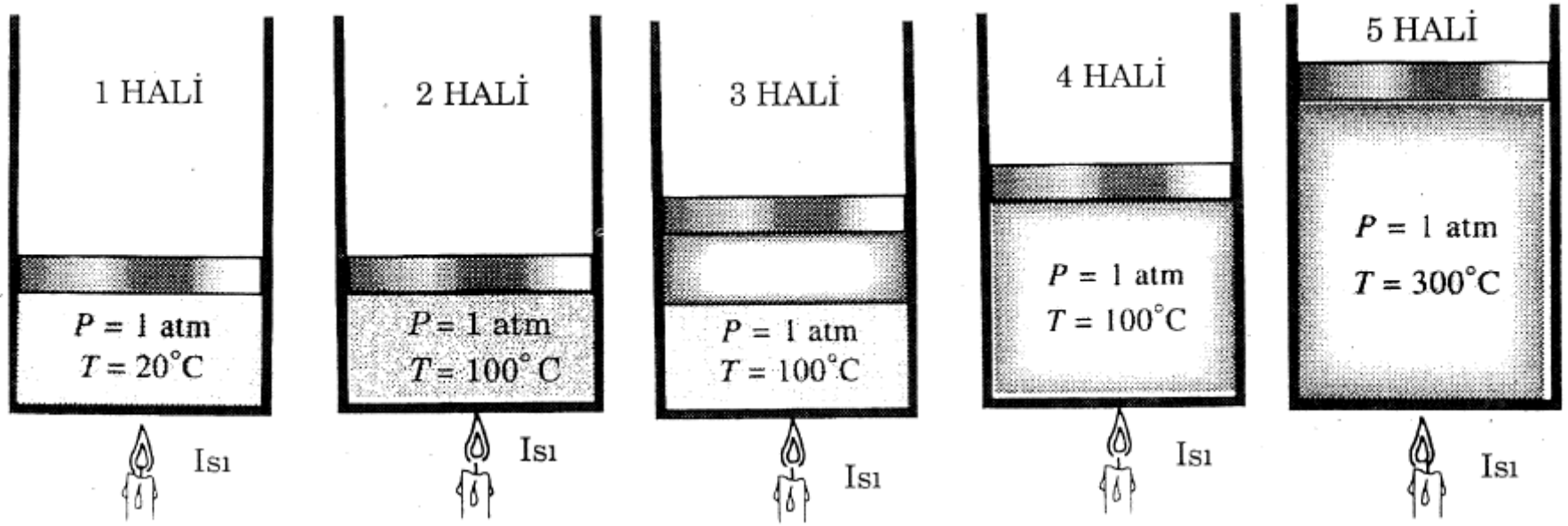
Faz değişimi tamamlandıktan sonra yeniden, bu kez buhardan oluşan tek fazlı bir bölgeye girilir. Isıtma işlemi sürdürölürse sıcaklık ve özgül hacmin arttığı gözlenir. Bu halde buhardan biraz ısı çekersek, sıcaklık düşer fakat yoğuşma olmaz.



Yoğuşma sınırında olmayan buhara **kızgın buhar** denir.

ŞEKİL 2-10

Isıtma sürdürölürse, buharın sıcaklığı yükselmeye başlar. (kızgın buhar).



ŞEKİL 2-11

Suyun sabit basınçta ısıtılmasının $T-v$ diyagramında gösterimi.

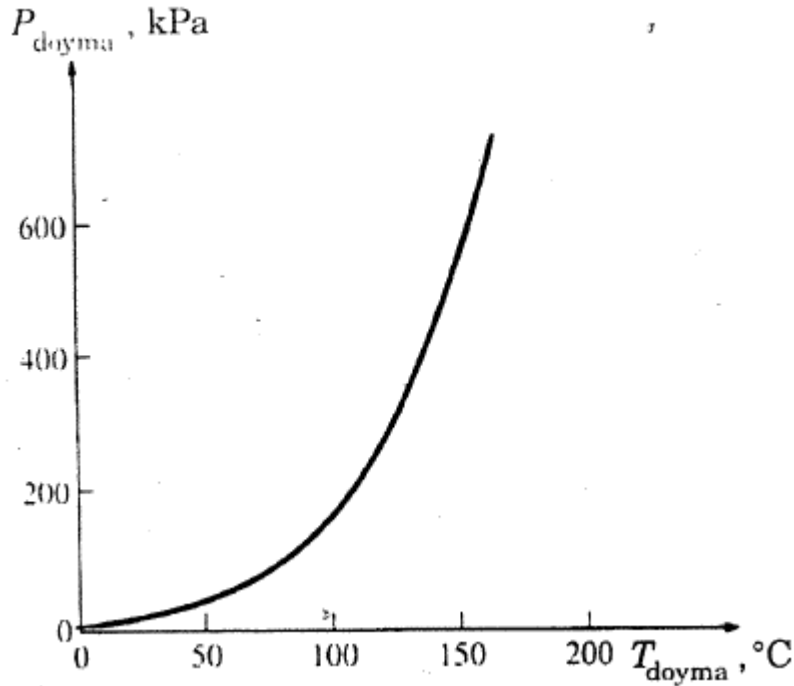
Doyma Sıcaklığı ve Doyma Basıncı

Verilen bir basınçta saf maddenin kaynamaya başladığı sıcaklık **doyma sıcaklığı** T_{doyma} olarak bilinir. Benzer bir biçimde verilen bir sıcaklıkta, saf maddenin kaynamaya başladığı basınç ise **doyma basıncı** olarak bilinir.

Faz değişimi sırasında sıcaklık ve basınç birbirlerine bağlı özelliklerdir ve aralarında bir ilişki vardır $T_{\text{doyma}} = f(P_{\text{doyma}})$.

Doyma Sıcaklığı ve Doyma Basıncı

Doyma sıcaklığının doyma basıncına göre değişimini veren eğri **sıvı-buhar doyma eğrisi** olarak adlandırılır.



ŞEKİL 2-12

Saf maddenin sıvı-buhar doyma eğrisi (sayısal değerler su içindir).

Doyma Sıcaklığı ve Doyma Basıncı

ÇİZELGE 2-1

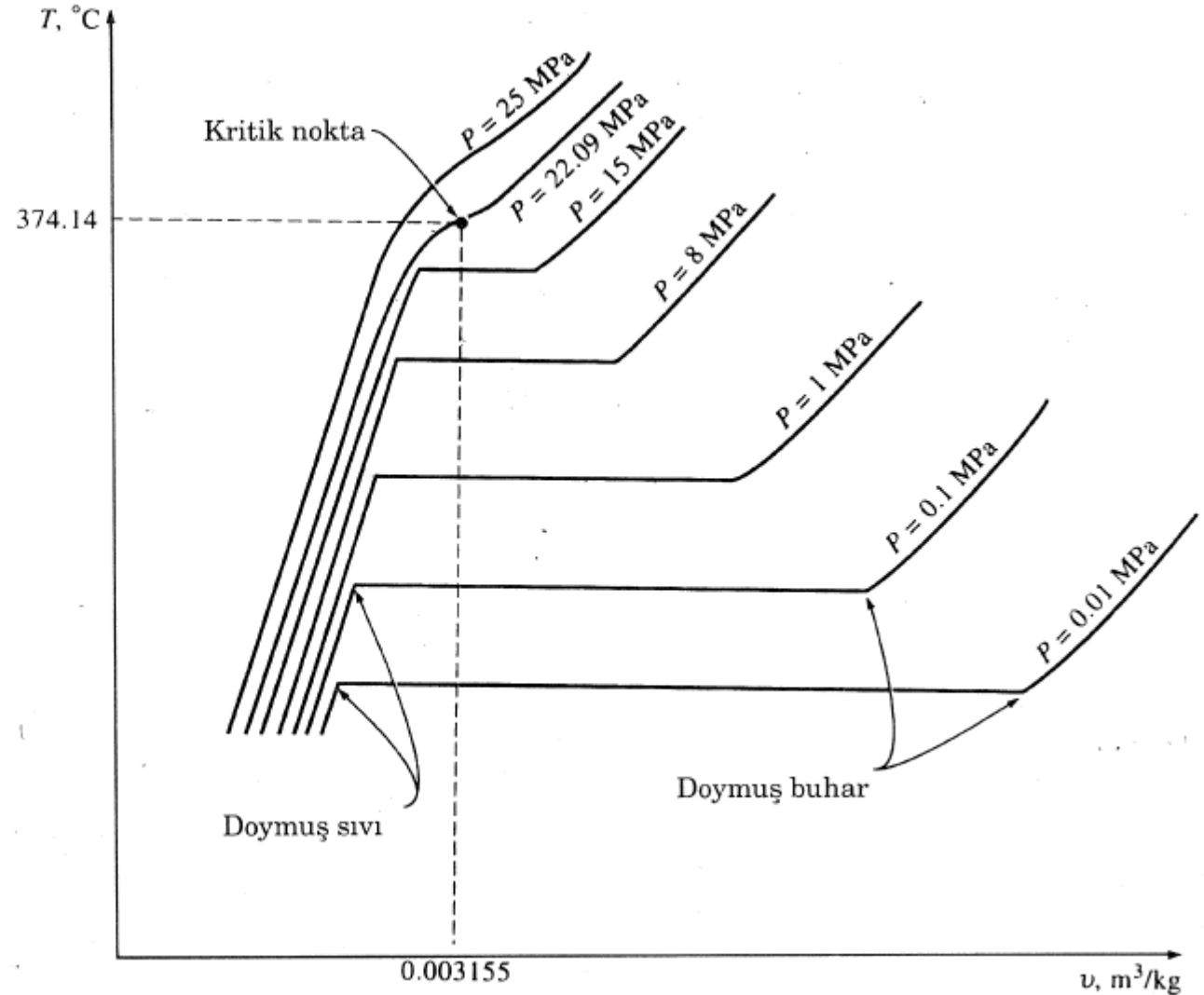
Standart atmosfer basıncının ve suyun kaynama (doyma) sıcaklığının yükseklikle değişimi

Yükseklik (m)	Atmosfer basıncı (kPa)	Kaynama sıcaklığı (°C)
0	101.33	100.0
1000	89.55	96.3
2000	79.50	93.2
5000	54.05	83.0
10000	26.50	66.2
20000	5.53	34.5

2.3 Özellik Diyagramları

Özellik diyagramlarının kullanılması, hal değişimi sırasında özelliklerin nasıl değiştiğini anlamak ve izlemek bakımından çok yararlıdır.

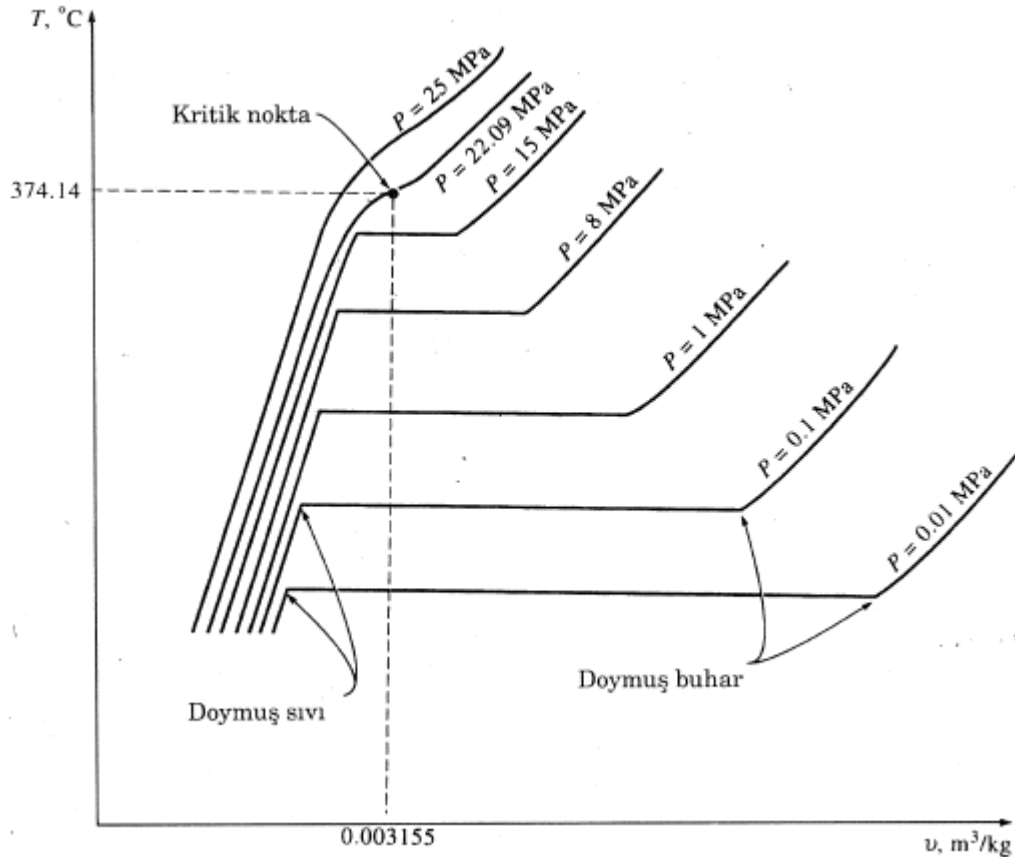
2.3 Özellik Diyagramları (1. T-v Diyagramı)



ŞEKİL 2-13

Değişik basınçlar için saf maddenin sabit basınçta faz değişimi eğrilerinin T - v diyagramında gösterimi (sayısal değerler su içindir).

2.3 Özellik Diyagramları (1. T-v Diyagramı)



Basınç arttıkça doymuş sıvı ile doymuş buhar hallerini birleştiren doğru giderek kısalır ve bir noktaya dönüşür. Bu nokta **kritik nokta** olarak bilinir ve doymuş sıvıyla doymuş buhar hallerinin aynı olduğu hal diye tanımlanır.

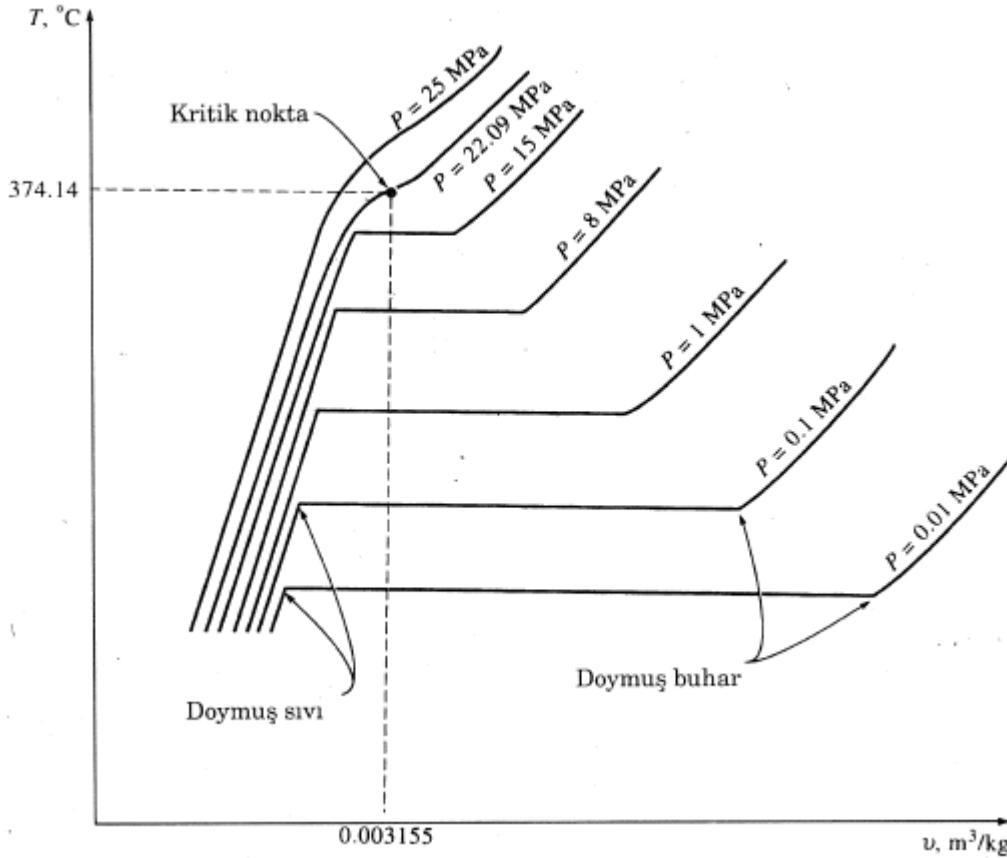
Su:

$T_{cr}=374,14^{\circ}\text{C}$, $P_{cr}=22,09\text{MPa}$,
 $v_{cr}=0,003155\text{m}^3/\text{kg}$

Helyum: $T_{cr}= - 267,85^{\circ}\text{C}$,

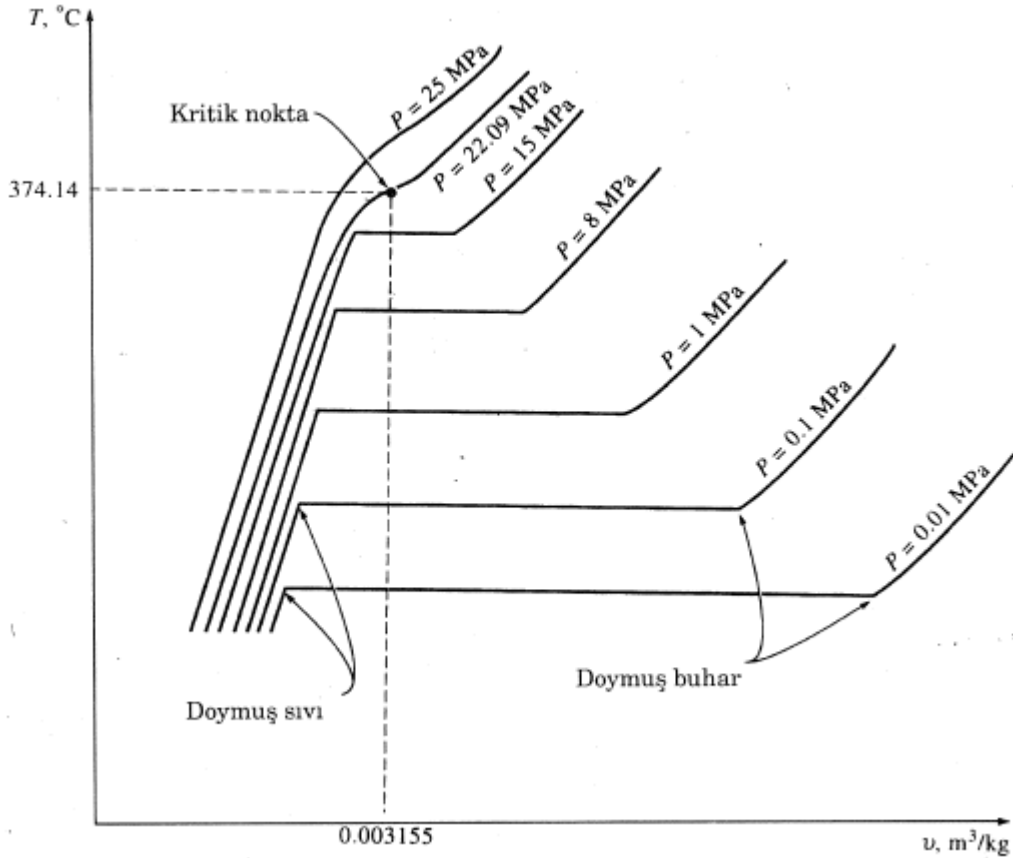
$P_{cr}=0,23\text{Mpa}$, $v_{cr}=0,0144\text{ m}^3/\text{kg}$

2.3 Özellik Diyagramları (1. T-v Diyagramı)



Kritik basıncın üzerindeki basınçlarda belirgin bir faz değişimi gözlenmez. Bunun yerine maddenin özgül hacmi sürekli olarak artar ve herhangi bir anda sadece bir fazda bulunur. Sonuçta madde buhar fazına geçer fakat bu geçişin ne zaman olduğu belirsizdir. Kritik halin yukarısında sıkıştırılmış sıvı bölgesiyle kızgın buhar bölgelerini birbirinden ayıran kesin bir çizgi yoktur.

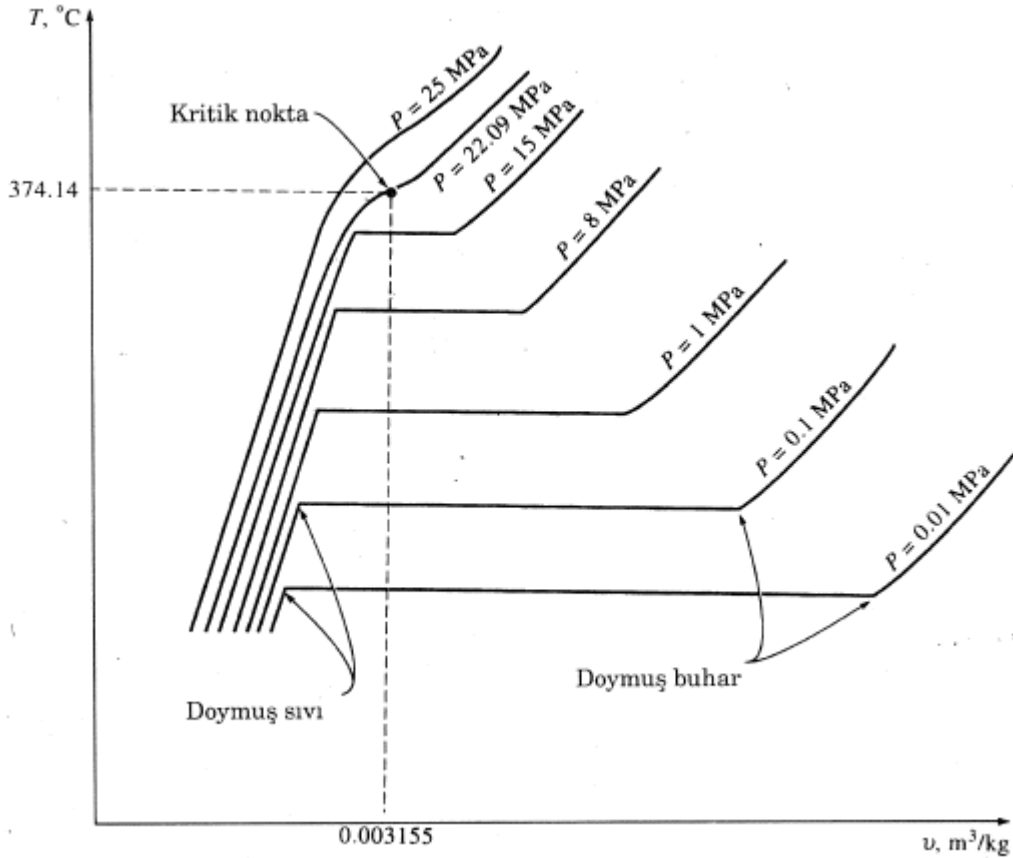
2.3 Özellik Diyagramları (1. T-v Diyagramı)



Genellikle kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda maddeye kızgın buhar, kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklardaki maddeye sıkıştırılmış sıvı denir.

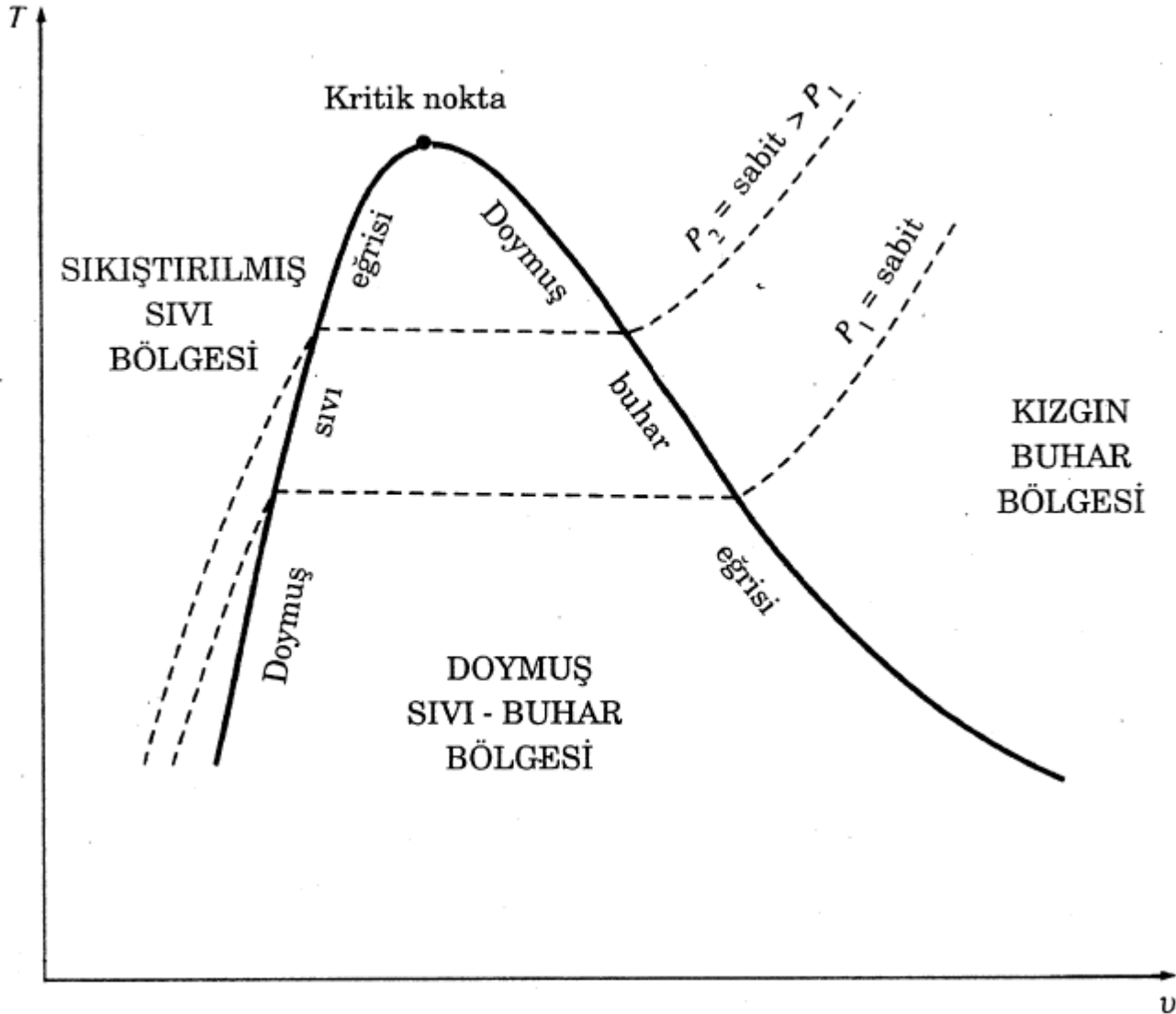
Doymuş sıvı hallerini gösteren noktalar birleştirildiğinde doymuş sıvı eğrisi elde edilir. Benzer olarak doymuş buhar halleri birleştirilerek doymuş buhar eğrisi çizilir.

2.3 Özellik Diyagramları (1. T-v Diyagramı)

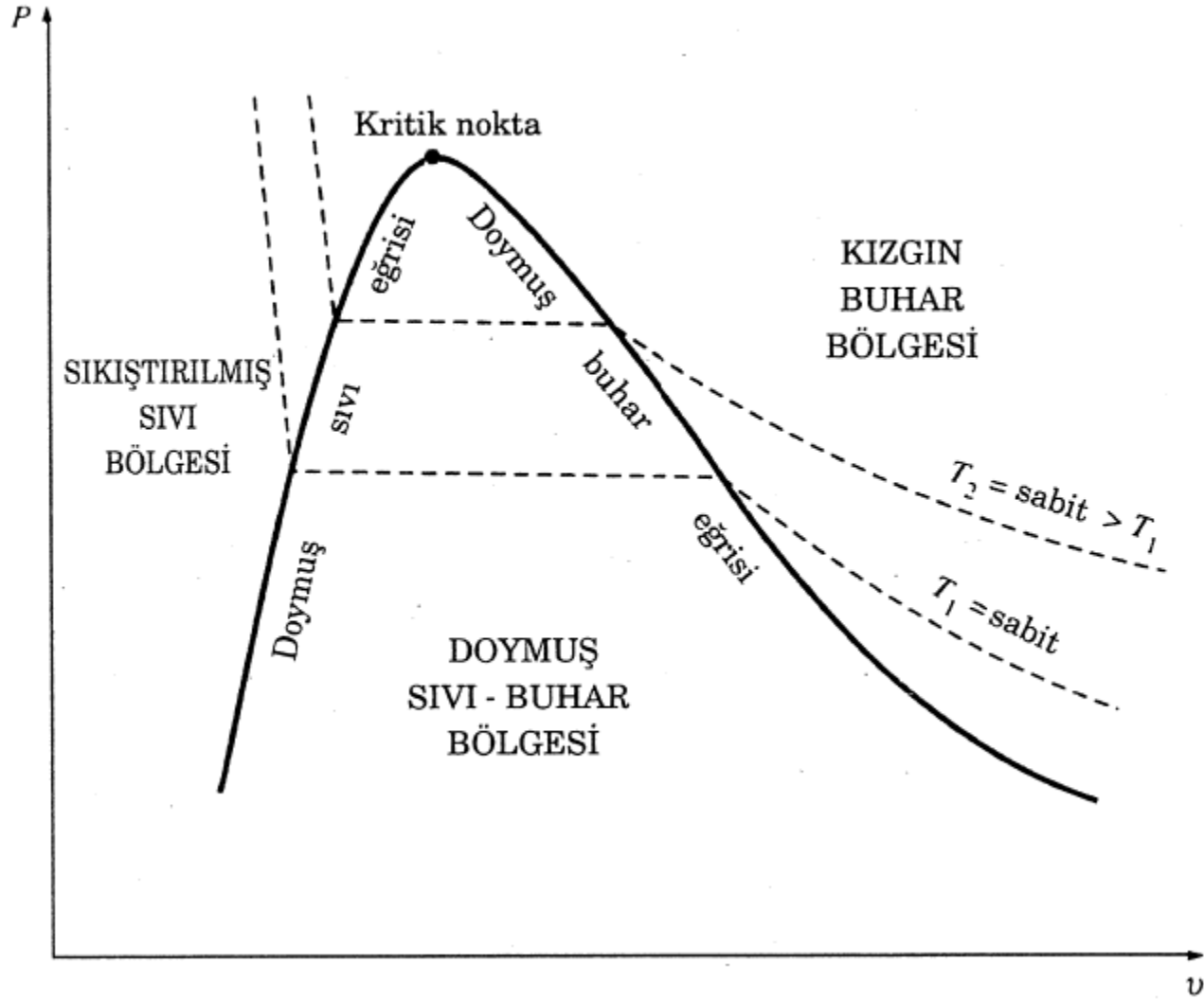


Tüm sıkıştırılmış sıvı halleri doymuş sıvı eğrisinin solunda kalır. Bu bölgeye **sıkıştırılmış sıvı bölgesi** adı verilir. Tüm kızgın buhar halleri doymuş buhar eğrisinin sağında kalır. Bu bölge **kızgın buhar bölgesi** olarak bilinir. Madde bu iki bölgede sadece sıvı veya sadece buhar fazındadır. Her iki fazın bir arada dengede bulunduğu hallerin tümü kubbenin altında, **doymuş sıvı-buhar karışımı veya ıslak buhar bölgesi** adı verilen bölgededir.

T-v Diyagramı



P-v Diyagramı



Üçlü Doğru ve Üçlü Nokta

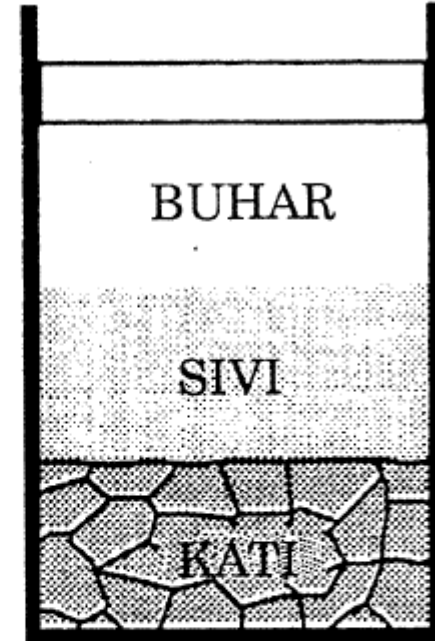
Saf maddenin he üç fazının da bir arada dengede olduğu hallerden oluşan doğruya **üçlü doğru** adı verilir. Üçlü doğru P-T diyagramında bir nokta olarak görülür, bu nedenle genellikle **üçlü nokta** adıyla bilinir.

Su: $T=0,01^{\circ}\text{C}$, $P=0,6113\text{kPa}$

Hiçbir madde üçlü nokta basıncının altında bir basınçta sıvı fazında kalıcı bir denge halinde bulunamaz. Aynı sav, donduğunda hacimleri küçülen maddeler kapsamında, sıcaklık için de geçerlidir.

Üçlü Doğru ve Üçlü Nokta

Su: $T=0,01^{\circ}\text{C}$, $P=0,6113\text{kPa}$



ŞEKİL 2-20

Üçlü nokta basınç ve sıcaklığında maddenin üç fazı denge halinde bulunur.

Değişik maddelerin üçlü nokta sıcaklık ve basınçları

Madde	Formül	T_{tp} K	P_{tp} kPa
Asetilen	C_2H_2	192.4	120
Amonyak	NH_3	195.40	6.076
Argon	A	83.81	68.9
Karbon (grafit)	C	3900	10100
Karbon dioksit	CO_2	216.55	517
Karbon monoksit	CO	68.10	15.37
Deuteryum	D_2	18.63	17.1
Etan	C_2H_6	89.89	8×10^{-4}
Etilen	C_2H_4	104.0	0.12
Helyum (λ noktası)	He	2.19	5.1
Hidrojen	H_2	13.84	7.04
Hidrojen klorür	HCl	158.96	13.9
Cıva	Hg	234.2	1.65×10^{-7}
Metan	CH_4	90.68	11.7
Neon	Ne	24.57	43.2
Azot oksit	NO	109.50	21.92
Azot	N_2	63.18	12.6
Azot oksit	N_2O	182.34	87.85
Oksijen	O_2	54.36	0.152
Paladyum	Pd	1825	3.5×10^{-3}
Platin	Pt	2045	2.0×10^{-4}
Kükürt dioksit	SO_2	197.69	1.67
Titanyum	Ti	1941	5.3×10^{-3}
Uranyum heksaflorür	UF_6	337.17	151.7
Su	H_2O	273.16	0.61
Zenon	Xe	161.3	81.5
Çinko	Zn	692.65	0.065

Süblimasyon

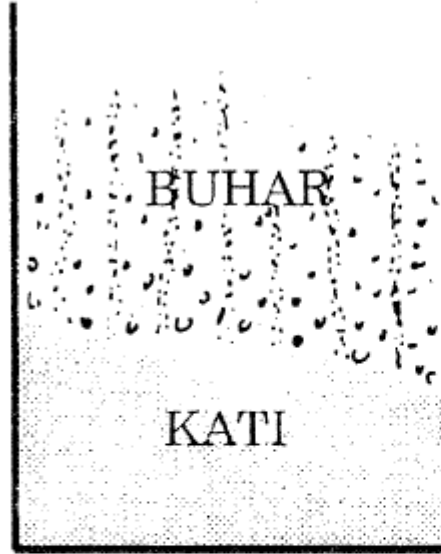
Bir maddede katı fazından buhar fazına iki yolla geçebilir.

1) Madde önce sıvılaşır sonra buharlaşır.

2) Katı madde doğrudan buhar fazına geçer.

Doğrudan geçiş ancak üçlü nokta altındaki basınçlarda olabilir. Çünkü bu basınçlarda maddenin sıvı fazında bulunabilmesi söz konusu değildir. Katı fazından doğrudan buhar fazına geçiş ***süblimasyon*** olarak adlandırılır.

Süblimasyon



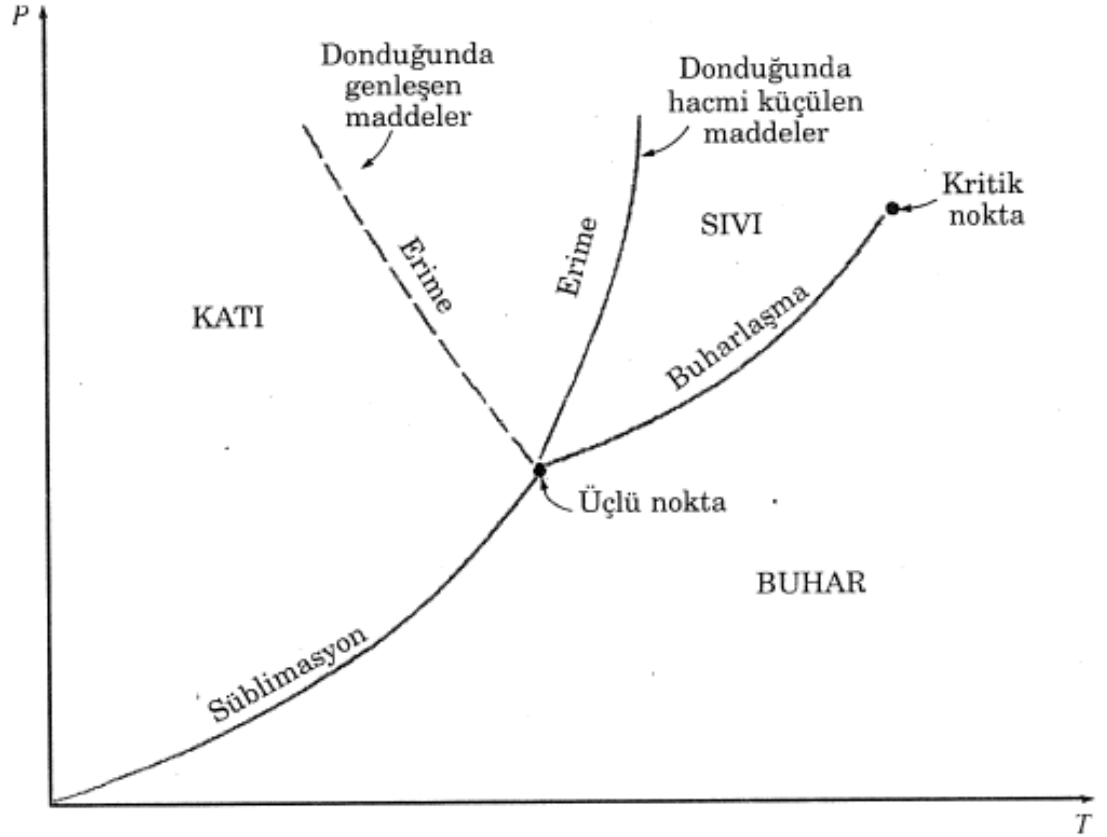
ŞEKİL 2-21

Düşük basınçlarda (üçlü nokta basıncının altında) katılar sıvı fazından geçmeden buharlaşır (süblimasyon).

P-T Diyagramı

Bu diyagram genellikle faz diyagramı olarak bilinir, çünkü her üç faz birbirinden bir eğriyle ayrılmıştır.

Süblimasyon eğrisi katı ve buhar bölgelerini ayırır, **buharlaşma** eğrisi sıvı ve buhar bölgelerini ayırır, **erime** eğrisi de katı ve sıvı bölgelerini ayırır. Bu üç eğri, her üç fazın bir arada dengede olduğu üçlü noktada buluşur.



ŞEKİL 2-22

Saf maddenin P - T diyagramı

Özelik Tabloları

Entalpi – Bir Karma Özelik

Termodinamik özellik tablolarına dikkatle bakan bir kimse iki yeni özelle karşılaşacaktır: entalpi h ve entropi s . Entropi, termodinamiğin ikinci yasasıyla ilgili bir özeliştir ve 6. bölümde ayrıntılı bir açıklaması yapıldıktan sonra kullanılacaktır. Fakat entalpi bu aşamada tanımlanabilir. Özellikle güç üretimi ve soğutmayla ilgili bazı sistemler ve hal değişimleri incelenirken (Şekil 2-25), birkaç özeliğin bileşiminden oluşan $U + PV$ terimine sıkça rastlanır. Kolaylık ve anlatım sadeliği açısından bu terim **entalpi** adı verilen ve H ile gösterilen yeni bir özellik olarak tanımlanmıştır. Entalpi,

$$H = U + PV \quad (\text{kJ}) \quad (2-1)$$

şeklinde, veya birim kütle için,

$$h = u + Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-2)$$

Özelik Tabloları



ŞEKİL 2-25

$u + Pv$ terimiyle, kontrol hacimlerinin çözümlemesinde sıkça karşılaşılr.

Özelik Tabloları

1.a Doymuş Sıvı ve Doymuş Buhar Halleri

Suyun doymuş sıvı ve doymuş buhar özellikleri Tablo A4 ve A5 te verilmiştir. Her iki tabloda aynı bilgileri içermektedir. A4 doyma sıcaklıklarına göre, A5 ise doyma basıncına göre düzenlenmiştir. Bu nedenle sıcaklık verildiğinde A4, basınç verildiğinde A5 in kullanılması kolaylık sağlar.

Doyma Sıcak. Bas. °C kPa T P_{doyma}		Özgül hacim m ³ /kg	
		Doy. sıvı v_f	Doy. buhar v_g
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

Sıcaklık

Doymuş sıvının
özellik hacmi

Karşı gelen
doyma basıncı

Doymuş
buharın
özellik hacmi

ŞEKİL 2-27

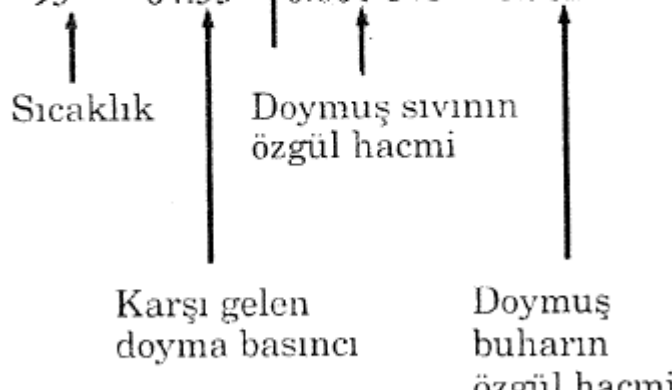
Tablo A-4'ün bir bölümü

v_f = doymuş sıvının özgül hacmi

v_g = doymuş buharın özgül hacmi

v_{fg} = v_g ile v_f 'nin farkı ($v_{fg} = v_g - v_f$)

Doyma		Özgül hacim m ³ /kg	
Sıcak. Bas.		Doy.	Doy.
°C	kPa	sıvı	buhar
T	P_{doyma}	v_f	v_g
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

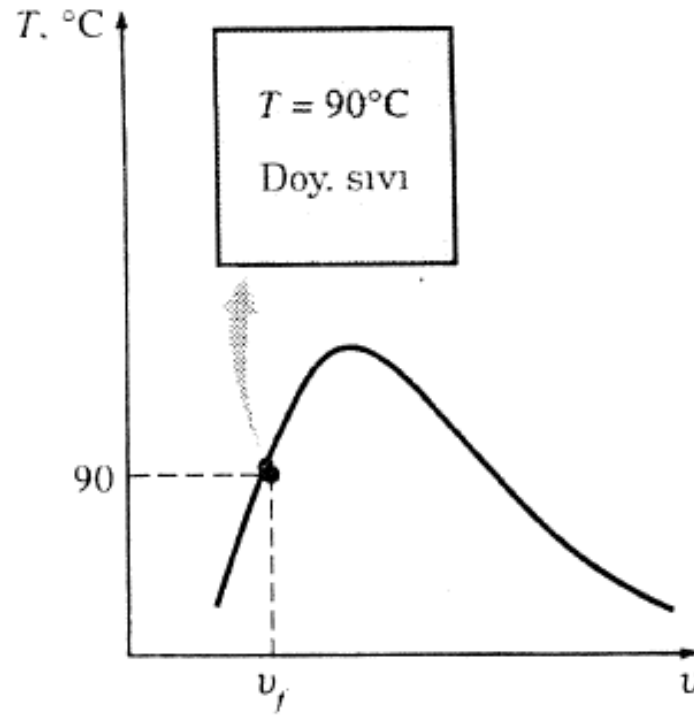


ŞEKİL 2-27

Tablo A-4'ün bir bölümü

ÖRNEK 1

Sabit hacimli bir kapta 90°C sıcaklıkta, 50 kg doymuş sıvı su bulunmaktadır. Kap içindeki basıncı ve kabın hacmini bulunuz.



Kap içindeki su doymuş sıvı olduğu için basınç 90 °C sıcaklıktaki doyma basıncı olacaktır:

$$P = P_{\text{doyma}, 90\text{ }^{\circ}\text{C}} = 70.14\text{ kPa} \quad (\text{Tablo A-4})$$

90 °C sıcaklıktaki doymuş sıvının özgül hacmi,

$$v = v_{f, 90\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.001036\text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tablo A-4})$$

olduğuna göre kabın hacmi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V = mv = (50\text{ kg})(0.001036\text{ m}^3/\text{kg}) = 0.0518\text{ m}^3$$

TABLO A-4

Doymuş su – Sıcaklık tablosu

Sıcak. °C T_{doyma}	Doyma basıncı kPa P	Özgül hacim m^3/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$		
		Doymuş sıvı v_f	Doymuş buhar v_g	Doymuş sıvı u_f	u_{fg}	Doymuş buhar u_g	Doymuş sıvı h_f	h_{fg}	Doymuş buhar h_g	Doymuş sıvı s_f	s_{fg}	Doymuş buhar s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

ÖRNEK 2

Bir piston silindir düzeneginde 50 kPa basınçta, 2 m³ doymuş su buharı bulunmaktadır. Silindir içindeki su buharının sıcaklığını ve kütlesini hesaplayınız.

TABLO A-5
Doymuş su – Basınç tablosu

Basınç kPa P	Doyma sıcak. °C T_{doyma}	Özgül hacim m^3/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$		
		Doymuş sıvı v_f	Doymuş buhar v_g	Doymuş sıvı u_f	u_{fg}	Doymuş buhar u_g	Doymuş sıvı h_f	h_{fg}	Doymuş buhar h_g	Doymuş sıvı s_f	s_{fg}	Doymuş buhar s_g
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564

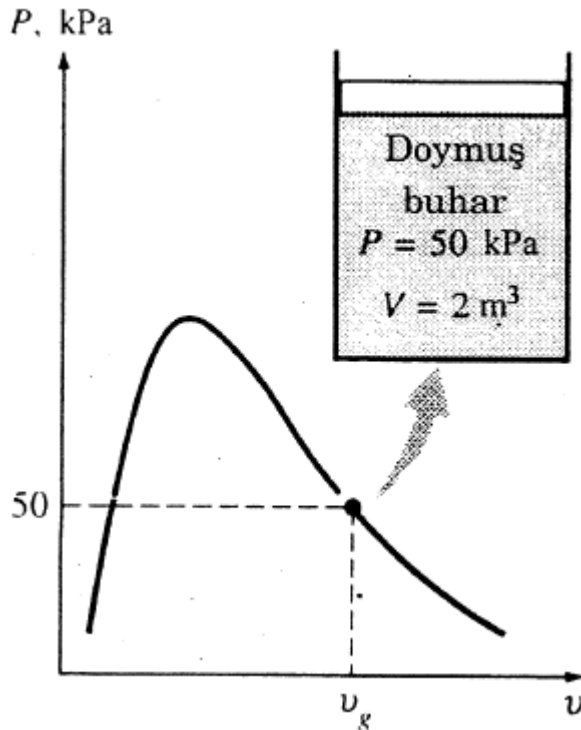
$$T = T_{\text{doyma}, 50 \text{ kPa}} = 81.33 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Tablo A-5})$$

Doymuş buharın 50 kPa basıncındaki özgül hacmi, Tablo A-5'ten bulunur:

$$v = v_{\text{doyma}, 50 \text{ kPa}} = 3.240 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tablo A-5})$$

Bu durumda silindir içindeki su buharının kütlesi

$$m = \frac{V}{v} = \frac{2 \text{ m}^3}{3.240 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.6173 \text{ kg}$$



Buharlaşma Entalpisi

h_{fg} büyüklüğü buharlaşma entalpisi (veya buharlaşma gizli ısı) olarak adlandırılır ve verilen bir basınç veya sıcaklıkta doymuş sıvının birim kütlesini buharlaştırmak için gereken enerjiyi belirtir.

Buharlaşma entalpisi, sıcaklık ve basınç arttıkça azalır ve kritik noktada sıfır olur.

ÖRNEK 3

200 g kütlesindeki doymuş sıvı su, 100 kPa sabit basınçta tümüyle buharlaştırılmaktadır.

a) Hacim değişikliğini,

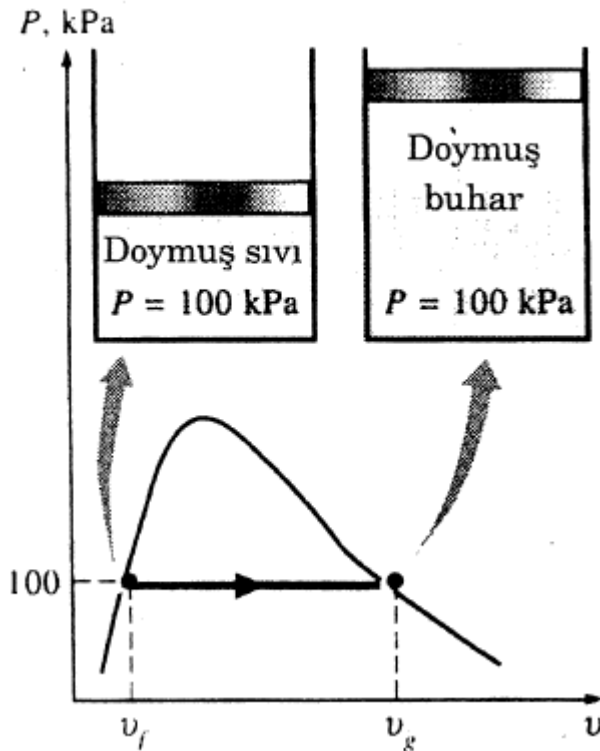
b) Suyu verilen enerjiyi hesaplayınız.

TABLO A-5
Doymuş su – Basınç tablosu

Basınç kPa P	Doyma sıcak. °C T_{doyma}	Özgül hacim m ³ /kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi kJ/(kg · K)		
		Doymuş sıvı v_f	Doymuş buhar v_g	Doymuş sıvı u_f	u_{fg}	Doymuş buhar u_g	Doymuş sıvı h_f	h_{fg}	Doymuş buhar h_g	Doymuş sıvı s_f	s_{fg}	Doymuş buhar s_g
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Basınç MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233

200 g kütlesindeki doymuş sıvı su, 100 kPa sabit basınçta tümüyle buharlaştırılmaktadır.

a) Hacim değişikliğini, b) Suyu verilen enerjiyi hesaplayınız.



$$v_{fg} = v_g - v_f = 1.6941 - 0.001043 = 1.6931 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\Delta V = m v_{fg} = (0.2 \text{ kg})(1.6931 \text{ m}^3/\text{kg}) = \mathbf{0.3386 \text{ m}^3}$$

Bir maddenin birim kütlesini sabit basınçta buharlaştırmak için gerekli enerji, o basınçtaki buharlaşma entalpisidir. Bu durumda suya verilen enerji;

$$m h_{fg} = (0.2 \text{ kg})(2257.5 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{451.5 \text{ kJ}}$$

Özellik Tabloları

1.b Doymuş Sıvı Buhar Karışımı

Buharlaşma sırasında maddenin bir bölümü sıvı fazında, bir bölümü ise buhar fazındadır, başka bir deyişle madde doymuş sıvıyla doymuş buharın bir karışımıdır.

Kuruluk Derecesi

Doymuş sıvı-buhar karışımının özelliklerini belirlemek için karışımdaki sıvı ve buhar fazlarının oranını bilmek gerekir. Bu da adı kuruluk derecesi (x) olan ve buhar kütlesinin toplam kütleyle oranını veren yeni bir özellik tanımlayarak yapılır.

$$x = \frac{m_{buhar}}{m_{toplam}}$$

$$m_{toplam} = m_{sıvı} + m_{buhar} = m_f + m_g$$

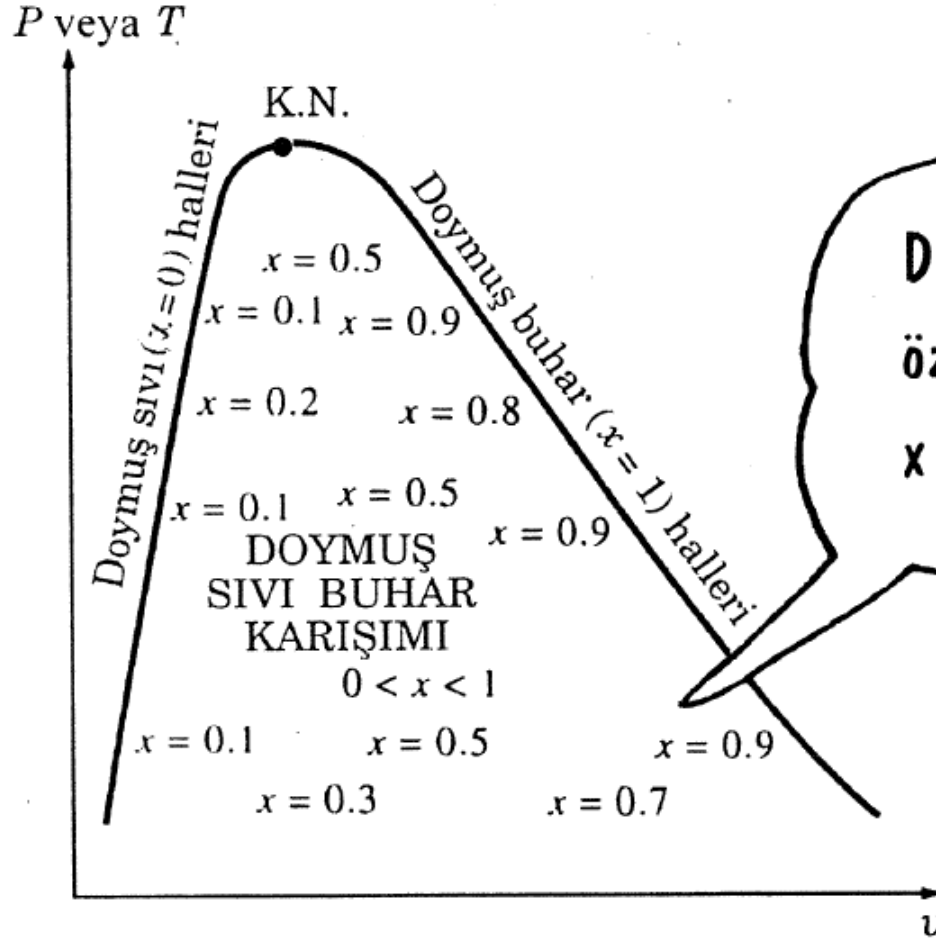
Kuruluk Derecesi

- Kuruluk derecesinin sadece doymuş sıvı-buhar karışımları için anlamı vardır. Sıkıştırılmış sıvı ve kızgın buhar bölgelerinde bir anlam taşımaz.
- Değeri her zaman 0 ile 1 arasındadır.
- Doymuş sıvı halindeki bir sistemin kuruluk derecesi 0 veya %0'dır.
- Doymuş buhar halindeki sistemin kuruluk derecesi 1 veya %100'dür.

Kuruluk Derecesi

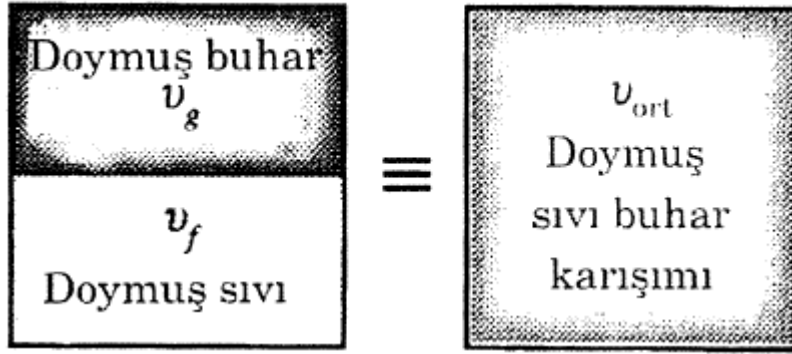
- Doymuş sıvı-buhar karışımı doymuş sıvı ve doymuş buhardan oluşan iki sistemin toplamı olarak düşünülebilir. Fakat sistemlerin kütleleri (her fazdaki kütle) genellikle bilinmez. Bu nedenle, fazların iyice karışarak düzgün dağılı (homojen) görünüm veren bir karışım oluşturdıkları düşünülebilir. Bu durumda karışımın özellikleri, göz önüne alınan doymuş sıvı-buhar karışımının ortalama özellikleri olacaktır.

Kuruluk Derecesi



Doymuş sıvı buhar karışımının özellikleri, kuruluk derecesi x ile hesaplanır.

Kuruluk Derecesi



ŞEKİL 2-34

İki fazlı bir sistem, hesaplama açısından düzgün dağılı bir karışım olarak ele alınır.

Doymuş sıvı-buhar karışımı içeren bir kap incelensin. Doymuş sıvının kapladığı hacim V_f , doymuş buharın kapladığı hacim ise V_g olsun. Toplam hacim bu ikisinin toplamı olacaktır. Ayrıca “ort” indisiyle karışımın ortalama özellikleri, t indisiyle de toplam kütle gösterilsin.

Kuruluk Derecesi

$$V = V_f + V_g$$

$$V = mv \rightarrow m_t v_{\text{ort}} = m_f v_f + m_g v_g$$

$$m_f = m_t - m_g \rightarrow m_t v_{\text{ort}} = (m_t - m_g) v_f + m_g v_g$$

m_t ile bölersek, $x = m_g/m_t$ olduğundan,

$$v_{\text{ort}} = (1 - x)v_f + xv_g$$

elde edilir. Bu bağıntı şöyle de yazılabilir :

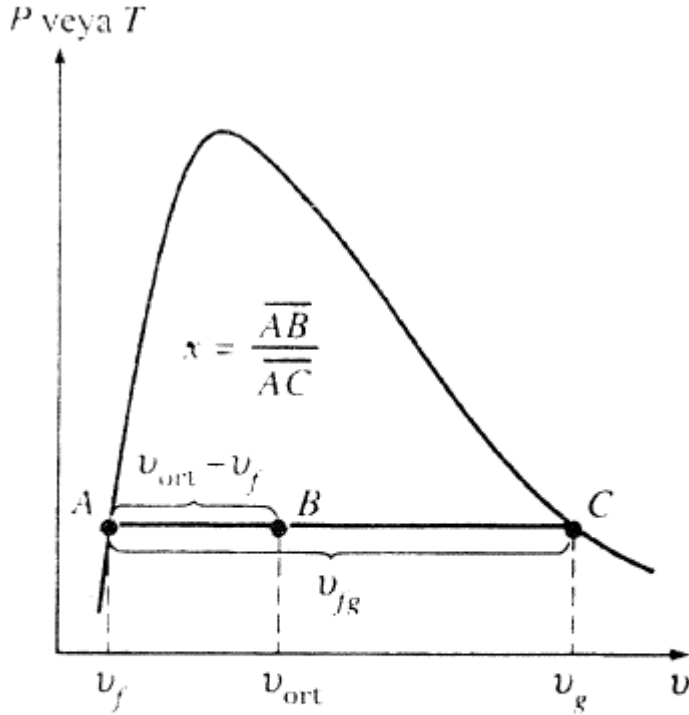
$$v_{\text{ort}} = v_f + xv_{fg} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

Burada $v_{fg} = v_g - v_f$ olmaktadır. Kuruluk derecesi x çözülürse,

$$x = \frac{v_{\text{ort}} - v_f}{v_{fg}}$$

Kuruluk Derecesi

Bu denklem kullanılarak kuruluk derecesi P - v ve T - v diyagramlarında yatay uzunluklarla eşleştirilebilir.



$$x = \frac{v_{\text{ort}} - v_f}{v_{fg}}$$

$$v_{\text{ort}} = v_f + x v_{fg} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$u_{\text{ort}} = u_f + x u_{fg} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h_{\text{ort}} = h_f + x h_{fg} \quad (\text{kJ/kg})$$

ŞEKİL 2-35

Kuruluk derecesi P - v ve T - v diyagramlarında yatay uzunluklarla orantılıdır.

ÖRNEK 4

Sabit hacimli kapalı bir kapta 90°C sıcaklıkta 10 kg su bulunmaktadır. Eğer suyun 8 kg'ı sıvı, geri kalanı buhar fazında ise,

a) Kaptaki basıncı,

b) Kabin hacmini hesaplayınız.

TABLO A-4

Doymuş su – Sıcaklık tablosu

Sıcak. °C T_{doyma}	Doyma basıncı kPa P	Özgül hacim m^3/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$		
		Doymuş sıvı v_f	Doymuş buhar v_g	Doymuş sıvı u_f	u_{fg}	Doymuş buhar u_g	Doymuş sıvı h_f	h_{fg}	Doymuş buhar h_g	Doymuş sıvı s_f	s_{fg}	Doymuş buhar s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

ÖRNEK 4

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki 90°C sıcaklıkta 10 kg su bulunmaktadır. Eğer suyun 8 kg'ı sıvı, geri kalanı buhar fazında ise,

a) Kaptaki basıncı, b) Kabın hacmini hesaplayınız.

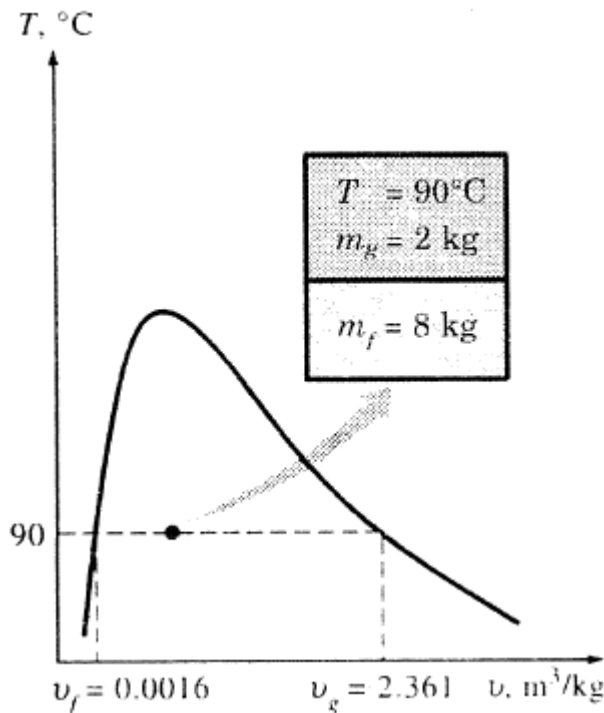
ÇÖZÜM

a) İki faz dengede bulundukları için, basınç verilen sıcaklıktaki doyma basıncıdır.

$$P = P_{\text{sat}} @ 90^\circ\text{C} = \mathbf{70.183 \text{ kPa}} \quad (\text{Table A-4})$$

b) 90°C sıcaklıkta

$$v_f = 0.001036 \text{ m}^3/\text{kg}$$



ÖRNEK 4

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki 90°C sıcaklıkta 10 kg su bulunmaktadır. Eğer suyun 8 kg'ı sıvı, geri kalanı buhar fazında ise,

a) Kaptaki basıncı, b) Kabın hacmini hesaplayınız.

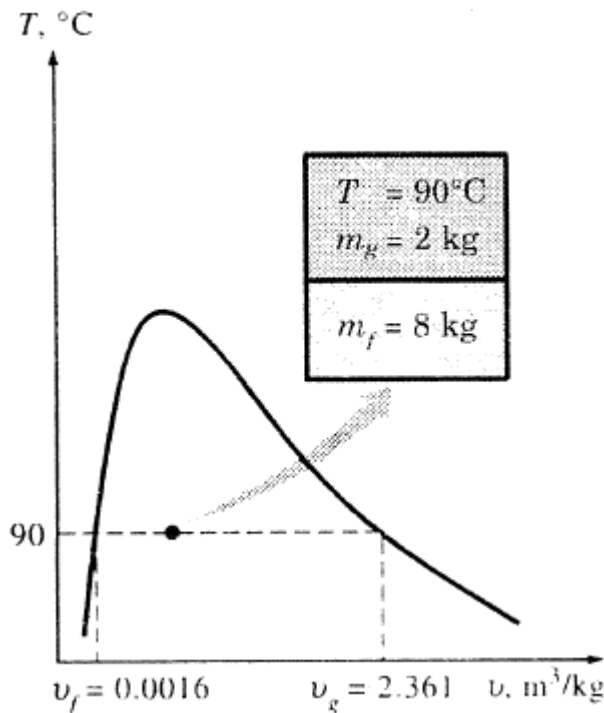
ÇÖZÜM :

b) 90°C sıcaklıkta, TABLO A-4'den;

$$v_f = 0.001036 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 2.3593 \text{ m}^3/\text{kg}$$

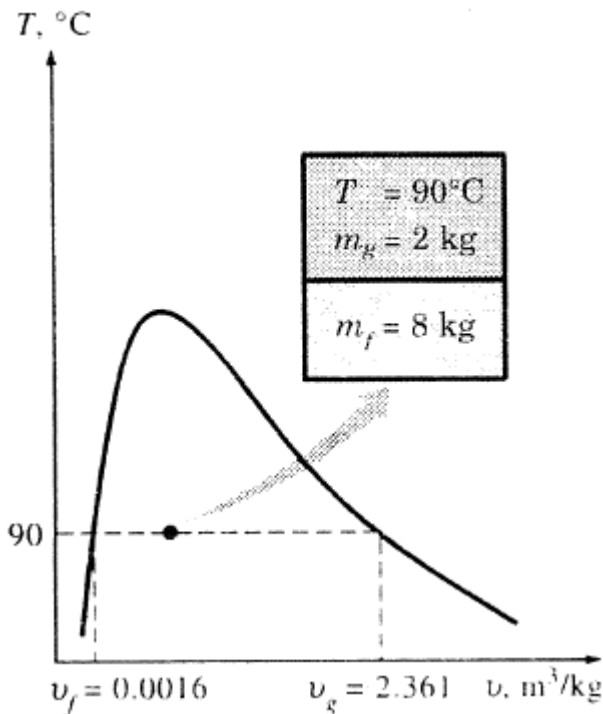
$$\begin{aligned} V &= V_f + V_g = m_f v_f + m_g v_g \\ &= (8 \text{ kg})(0.001036 \text{ m}^3/\text{kg}) + (2 \text{ kg})(2.3593 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= \mathbf{4.73 \text{ m}^3} \end{aligned}$$



ÖRNEK 4

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki 90°C sıcaklıkta 10 kg su bulunmaktadır. Eğer suyun 8 kg'ı sıvı, geri kalanı buhar fazında ise,

a) Kaptaki basıncı, b) Kabın hacmini hesaplayınız.



b) İKİNCİ YOL:

$$x = \frac{m_g}{m_t} = \frac{2 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} = 0.2$$

$$\begin{aligned} v &= v_f + x v_{fg} \\ &= 0.001036 \text{ m}^3/\text{kg} + (0.2)[(2.3593 - 0.001036) \text{ m}^3/\text{kg}] \\ &= 0.473 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$V = m v = (10 \text{ kg})(0.473 \text{ m}^3/\text{kg}) = 4.73 \text{ m}^3$$

ÖRNEK 5

80 litrelik bir kapta 160 kPa basınçta 4 kg soğutucu akışkan-12 bulunmaktadır. Soğutucu akışkanın;

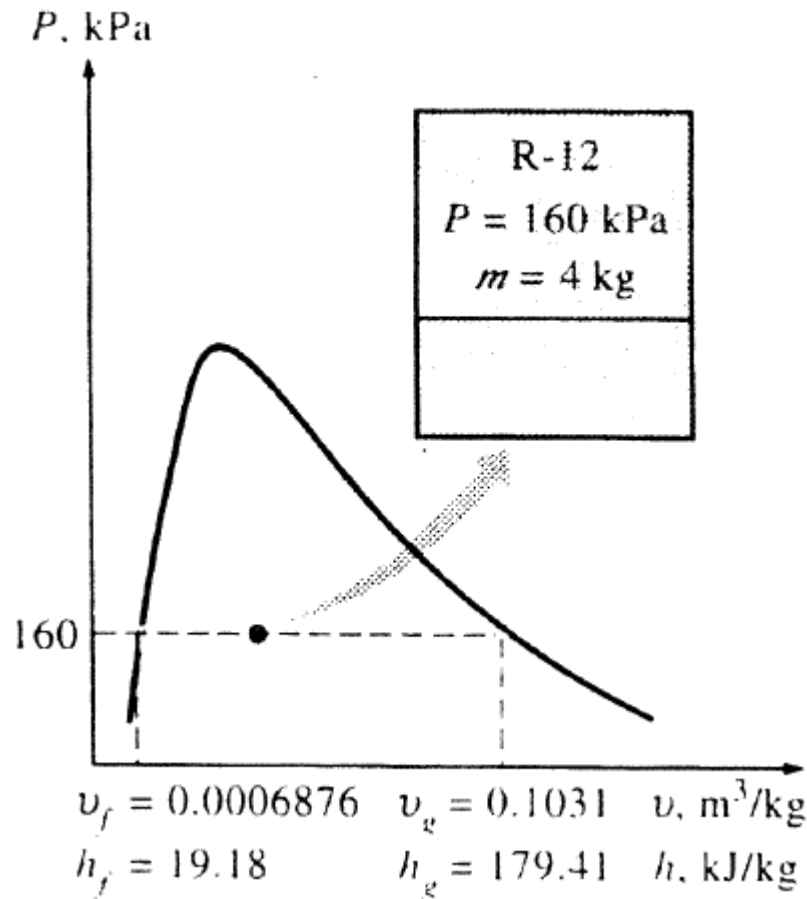
a) Sıcaklığını,

b) Kuruluk derecesini,

c) Entalpisini,

d) Buhar fazı tarafından kaplanan hacmi bulunuz.

ÖRNEK 5



a)
$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.080 \text{ m}^3}{4 \text{ kg}} = 0.02 \text{ m}^3/\text{kg}$$

160 kPa basınçta, Tablo A-12'den

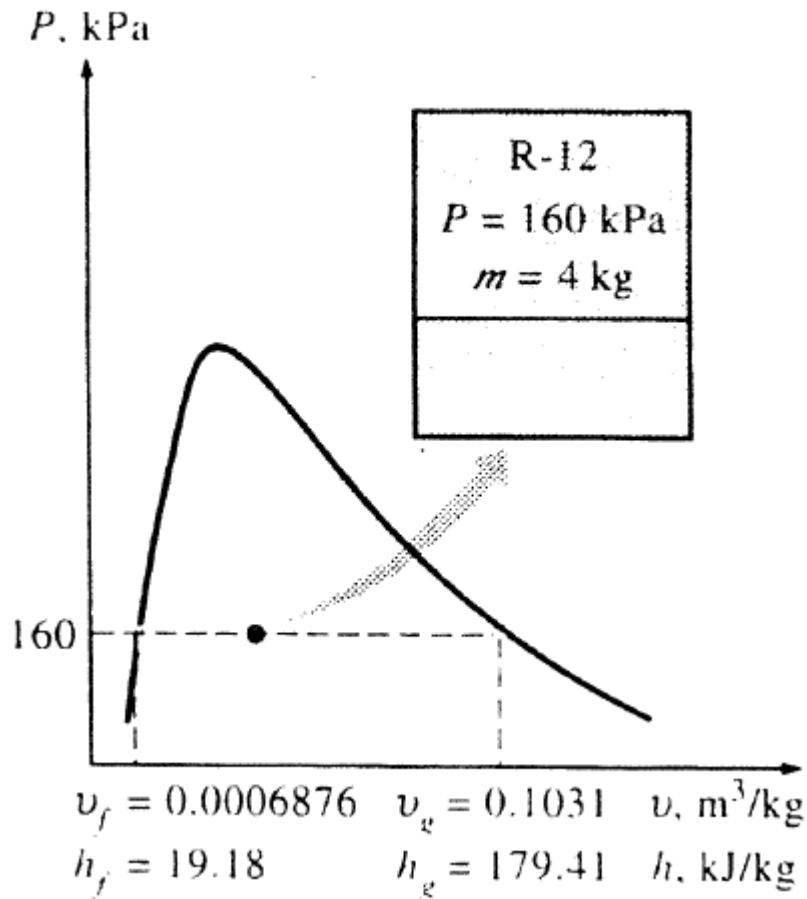
$$v_f = 0.0006876 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.1031 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_f < v < v_g$$

$$T = T_{\text{doyma}, 160 \text{ kPa}} = -18.49 \text{ }^\circ\text{C}$$

ÖRNEK 5

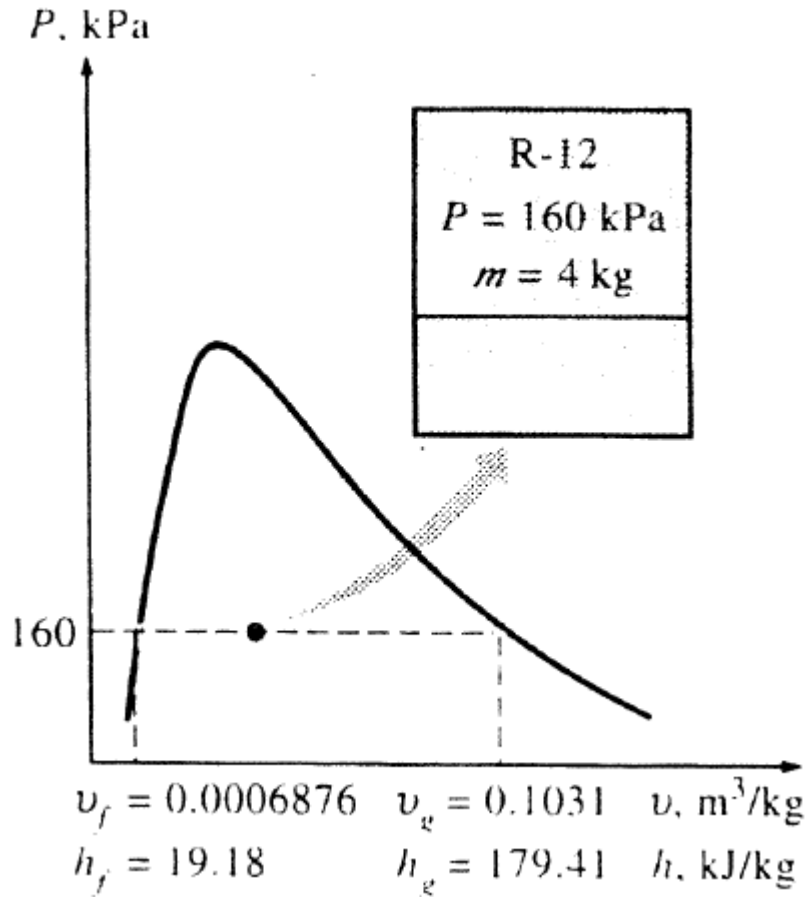


b) Kuruluk derecesi

$$X = \frac{v - v_f}{v_{fg}}$$

$$= \frac{0.02 - 0.0007}{0.1031 - 0.0007} = 0.188$$

ÖRNEK 5



c) Entalpi

160 kPa basınçta, Tablo A-12'den

$$h_f = 19.18 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 160.23 \text{ kJ/kg}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

$$= 19.18 \text{ kJ/kg} + (0.188)(160.23 \text{ kJ/kg})$$

$$= 49.3 \text{ kJ/kg}$$

ÖRNEK 5

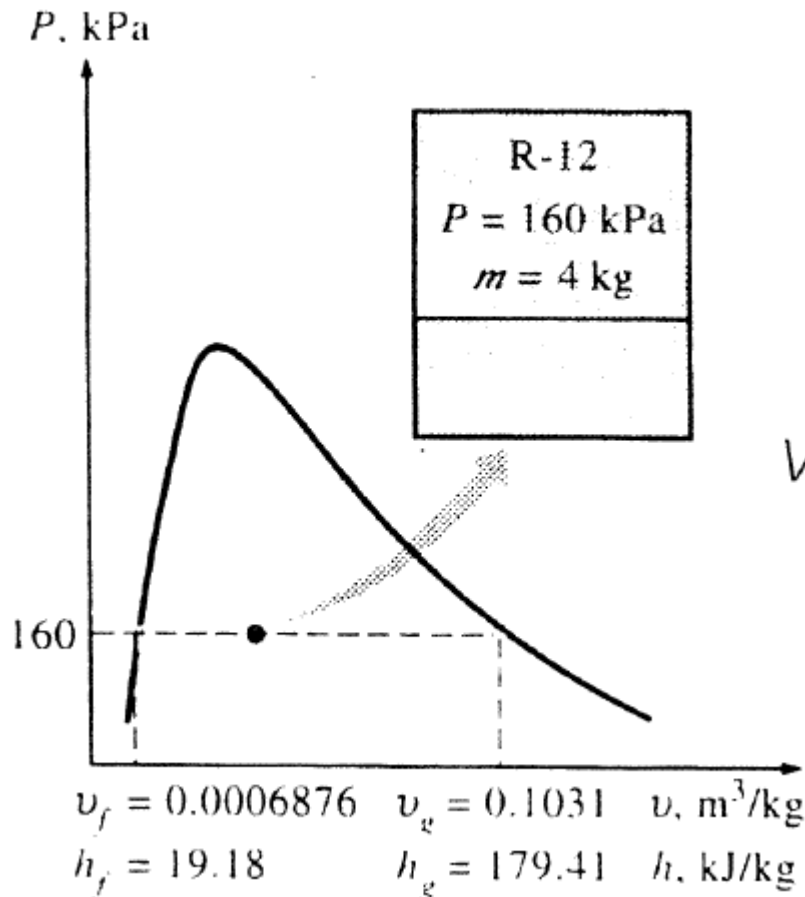
d) Buharın kütlesi

$$m_g = x m_t = (0.188)(4 \text{ kg}) = 0.752 \text{ kg}$$

Buhar fazının kapladığı hacim

$$\begin{aligned} V_g &= m_g v_g = (0.752 \text{ kg})(0.1031 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= 0.0775 \text{ m}^3 \text{ (veya 77.5 L)} \end{aligned}$$

Kabın hacminin geri kalan kısmı ise 2,5 litre sıvı tarafından doldurulmaktadır.



KIZGIN BUHAR

$T, ^\circ\text{C}$	$v,$ m^3/kg	$u,$ kJ/kg	$h,$ kJ/kg
$P = 0.1 \text{ MPa} (99.63^\circ\text{C})$			
Doy.	1.6940	2506.1	2675.5
100	1.6958	2506.7	2676.2
150	1.9364	2582.8	2776.4
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
1300	7.260	4683.5	5409.5
$P = 0.5 \text{ MPa} (151.86^\circ\text{C})$			
Doy.	0.3749	2561.2	2748.7
200	0.4249	2642.9	2855.4
250	0.4744	2723.5	2960.7

Doymuş buhar eğrisinin sağındaki bölgede madde kızgın buhardır. Kızgın buhar bölgesi tek fazlı bir bölge olduğundan sıcaklık ve basınç artık birbirine bağlı değildir. Dolayısıyla bu iki özellik kullanılarak hal kızgın buhar tablosundan belirlenebilir.

ŞEKİL 2-39

Tablo A-6'nın bir bölümü.

KIZGIN BUHAR

Kızgın buhar bölgesinde özellikler aşağıdaki sınırlar içinde kalırlar.

Verilen bir sıcaklık T de $P < P_{\text{doyma}}$ ise kızgın buhar

Verilen bir basınç P de $T > T_{\text{doyma}}$ ise kızgın buhar

Verilen bir T veya P de $v > v_g$ ise kızgın buhar

Verilen bir T veya P de $u > u_g$ ise kızgın buhar

Verilen bir T veya P de $h > h_g$ ise kızgın buhar

ÖRNEK 6

Suyun 300 kPa basınç ve 200°C sıcaklıktaki iç enerjisini belirleyiniz.

ÖRNEK 6

TABLO A-5
Doymuş su – Basınç tablosu

Basınç MPa P	Doyma sıcak. °C T_{doyma}	Özgül hacim m^3/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$		
		Doymuş sıvı v_f	Doymuş buhar v_g	Doymuş sıvı u_f	u_{fg}	Doymuş buhar u_g	Doymuş sıvı h_f	h_{fg}	Doymuş buhar h_g	Doymuş sıvı s_f	s_{fg}	Doymuş buhar s_g
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628

ÖRNEK 6

Tablo A-6'dan suyun 300 kPa basınçta doyma sıcaklığı $133,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Verilen sıcaklık $T > T_{\text{doyma}}$ olduğundan, suyun hali kızgın buhar bölgesindedir.

Bu durumda iç enerji Tablo A-6'dan belirlenir.

$$u = 2650,7 \text{ kJ/kg}$$

TABLO A-6
Kızgın su buharı

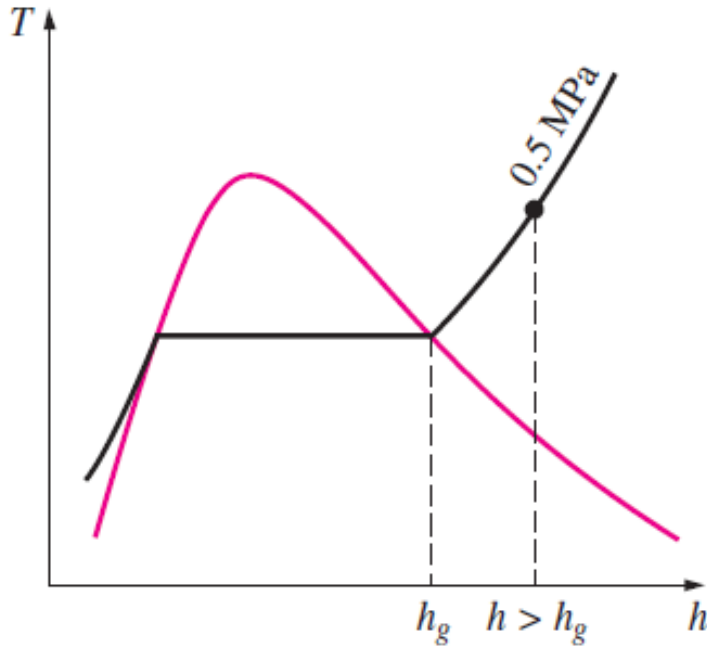
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$					$P = 0.05 \text{ MPa (81.33°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.63°C)}$			
Doymuş	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
$P = 0.20 \text{ MPa (120.23°C)}$					$P = 0.30 \text{ MPa (133.55°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.63°C)}$			
Doymuş	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985

ÖRNEK 7

Basıncı 0,5 MPa, entalpisi 2890 kJ/kg olan suyun sıcaklığını bulunuz.

ÖRNEK 7

Basıncı 0,5 MPa, entalpisi 2890 kJ/kg olan suyun sıcaklığını bulunuz.



0.5 MPa basınçta doymuş buharın entalpisi $h_g = 2748,7$ kJ/kg'dır.

Bu durumda;

$h > h_g$ olduğundan, hal kızgın buhar bölgesindedir. Tablo A-6'dan

ÖRNEK 7

Tablo A-6'dan 0,5 Mpa basınç için aşağıdaki değerler okunur.

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
$P = 0.50 \text{ MPa (151.86°C)}$				
Doymuş	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329

$h=2890$ kJ/kg değeri yukarıdaki tablo ile karşılaştırıldığında, sıcaklığın 200°C ile 250°C arasında olduğu görülür. Doğrusal oranlama ile sıcaklık yaklaşık olarak için aşağıdaki değer bulunur.

$$T=216,4^{\circ}\text{C}$$

3. Sıkıştırılmış Sıvı

Sıkıştırılmış sıvı için literatürde pek fazla bilgi yoktur ve Tablo A7 bu kitapta sıkıştırılmış sıvı özelliklerini veren tek tablodur. Literatürde sıkıştırılmış sıvıya ilişkin bilgilerin azlığı, sıkıştırılmış sıvı özelliklerinin basınçtan bir ölçüde bağımsız olmasından dolayıdır. Sıkıştırılmış sıvı özelliklerinin basınçla değişimi çok azdır. Örneğin basıncın 100 kat artması, özelliklerin %1 den daha az değişmesine neden olur.

3. Sıkıştırılmış Sıvı

Sıkıştırılmış sıvıya ait bilgilerin yokluğunda, sıkıştırılmış sıvı özelliklerini doymuş sıvı özelliklerine eşit almak, genellikle benimsenen bir uygulamadır. Böylece sıkıştırılmış sıvı için;

$$v \cong v_{f,T}$$

yazılabilir. Burada v özgül hacim, iç enerji veya entalpi olabilir. Bu üç özellik arasında entalpi basınçtan en çok etkilenen özelliktir. Bu nedenle yüksek basınçlarda aşağıda verilen bağıntının kullanılması hatayı önemli ölçüde azaltacaktır.

3. Sıkıştırılmış Sıvı

$$h \cong h_{f,T} + v_f(P - P_{\text{doyma}})$$

Verilen bir sıcaklık T de $P > P_{\text{doyma}}$ ise sıkıştırılmış sıvı

Verilen bir basınç P de $T < T_{\text{doyma}}$ ise sıkıştırılmış sıvı

Verilen bir T veya P de $v < v_f$ ise sıkıştırılmış sıvı

Verilen bir T veya P de $u < u_f$ ise sıkıştırılmış sıvı

Verilen bir T veya P de $h < h_f$ ise sıkıştırılmış sıvı

ÖRNEK 8

80C sıcaklık ve 5 MPa basınçta sıkıştırılmış sıvı suyun özgül iç enerjisini

- a) Sıkıştırılmış sıvı tablosunu kullanarak;
- b) Doymuş sıvı özellikleri ile hesaplayınız. İkinci yöntemde hata ne kadar olur?

ÖRNEK 8

Çözüm 80 °C sıcaklıkta suyun doyma basıncı 47.39 kPa'dır. 5 Mpa bu değerden büyük olduğu için suyun verilen halde sıkıştırılmış sıvı bölgesinde olduğu açıktır (Şekil 2-42).

(a) Sıkıştırılmış sıvı tablosundan (Tablo A-7):

$$P = 5 \text{ Mpa ve } T = 80 \text{ °C için, } u = 333.72 \text{ kJ/kg}$$

(b) Doymuş sıvı-buhar karışımı tablosundan (Tablo A-4):

$$u \cong u_{f, 80 \text{ °C}} = 334.86 \text{ kJ/kg}$$

Yüzde hata

$$\frac{334.86 - 333.72}{333.72} \times 100 = \%0.34$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi hata yüzde birden azdır.

Referans Hali ve Referans Değerleri

u , h ve s 'nin değerleri doğrudan ölçülemez. Bu nedenle termodinamik bağıntılar kullanılarak hesaplanır. Söz konusu termodinamik bağıntılar özelliklerin bir haldeki değerlerini değil, iki hal arasındaki farkını hesaplar. Bu nedenle uygun bir referans halinin seçilmesi ve özelliklere bu noktada sıfır değerinin atanması gerekir.

Su için $0,01^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki doymuş sıvı hali referans halidir.

Soğutucu akışkan Freon 12 için referans hali -40°C sıcaklıktaki doymuş sıvı halidir.

Referans halinde, entalpi ve entropiye sıfır değeri atanır.

ÖRNEK 9

Aşağıdaki çizelgede eksik olan özellikleri bulun ve halin hangi fazda olduğunu belirtin.

	$T, ^\circ\text{C}$	P, kPa	$u, \text{kJ/kg}$	x	Faz açıklaması
(a)		200		0.6	
(b)	125		1600		
(c)		1000	2950		
(d)	75	500			
(e)		850		0.0	

ÖRNEK 9

Çözüm (a) Kuruluk derecesi $x = 0.6$ olarak verilmiştir. Bu nedenle kütlenin yüzde 60'ı buhar, yüzde 40'ı sıvıdır ve hal 200 kPa basınçta **doymuş sıvı-buhar karışımı**dır. Sıcaklık bu basınçtaki doyma sıcaklığıdır:

$$T = T_{\text{doyma, 200 kPa}} = 120.23 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Tablo A-5})$$

Tablo A-5'den 200 kPa basınçta $u_f = 504.49 \text{ kJ/kg}$ ve $u_{fg} = 2025.0 \text{ kJ/kg}$ değerleri elde edildikten sonra, 2-6 numaralı denklem kullanılarak doymuş sıvı-buhar karışımının ortalama iç enerjisi hesaplanır:

$$\begin{aligned} u &= u_f + x u_{fg} \\ &= 504.49 \text{ kJ/kg} + (0.6)(2025.0 \text{ kJ/kg}) \\ &= 1719.49 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ÖRNEK 9

b)

125 °C'de $u_f = 524.74$ kJ/kg ve $u_g = 2534.6$ kJ/kg'dır.

$$524.74 < 1600 < 2534.6$$

olduğu görülür. Bu nedenle hal, **doymuş sıvı-buhar karışımı** bölgesindedir. Eğer verilen iç enerji değeri 524.74'ten küçük olsaydı, halin sıkıştırılmış sıvı bölgesinde, 2534.6'dan büyük olsaydı halin kızgın buhar bölgesinde olacağı not edilmelidir:

$$P = P_{\text{doyma, 125 °C}} = 232.1 \text{ kPa} \quad (\text{Tablo A-4})$$

Kuruluk derecesi:

$$x = \frac{u - u_f}{u_{fg}} = \frac{1600 - 524.74}{2009.9} = 0.535$$

ÖRNEK 9

(c) Burada (b) şıkkına benzer bir durum söz konusudur, sıcaklık yerine basınç verilmiştir. Verilen basınçta u_f ve u_g değerleri Tablo A-5'ten okunur. 1 Mpa basınçta, $u_f = 761.68$ kJ/kg ve $u_g = 2583.6$ kJ/kg'dır. Verilen özgül iç enerji değeri 2950 kJ/kg olup, 1MPa basınçtaki u_g 'den büyüktür. Bu nedenle, verilen hal **kızgın buhar** bölgesindedir. Sıcaklık, verilen basınç ve iç enerji değerlerini kullanarak, kızgın buhar tablosunda yapılacak bir doğrusal oranlamayla hesaplanır:

$$T = 395.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

(Tablo A-6)

Kuruluk derecesi sütunu bu şık için boş kalacaktır, çünkü kızgın buhar bölgesinde kuruluk derecesinin bir anlamı yoktur.

(d) Bu ıkta sıcaklık ve basınç verilmiştir, fakat halin hangi bölgede olduğu bilinmediği için öncelikle halin sıkıştırılmış sıvı, doymuş sıvı-buhar karışımı veya kızgın buhar bölgelerinden hangisinde olduğunu belirlemek gerekir. Bu amaçla doyma tablosundan (Tablo A-5) verilen basınca karşı gelen doyma sıcaklığı bulunur: 500 kPa basınçta, $T_{\text{doyma}} = 151.86 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Daha sonra verilen sıcaklıkla doyma sıcaklığı karşılaştırılır. $75 \text{ }^{\circ}\text{C} < 151.86 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğundan halin **sıkıştırılmış sıvı** bölgesinde olduğu anlaşılır (Şekil 2-43). Eğer sıcaklık doyma sıcaklığına eşit olsaydı halin doymuş sıvı-buhar karışımı bölgesinde, sıcaklık doyma sıcaklığından büyük olsaydı halin kızgın buhar bölgesinde olacağı not edilmelidir. İç enerji sıkıştırılmış sıvı tablosundan bulunabilir, fakat verilen haldeki basınç tablodaki bulunan en düşük basınçtan daha aşağıdadır. Bu nedenle, sıkıştırılmış sıvı özelliklerinin aynı sıcaklıkta (basınçta değil) doymuş sıvı özelliklerine eşdeğer olduğu kabul edilebilir:

$$u \cong u_{f, 75 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 313.90 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tablo A-4})$$

ÖRNEK 9

(e) Kuruluk derecesi, $x = 0.0$ olarak verilmiştir. Bu nedenle 850 kPa basınçta **doymuş sıvı** hali söz konusudur. Sıcaklığın verilen basınçta doyma sıcaklığı, iç enerjinin ise verilen basınçta doymuş sıvının iç enerjisi olması gerekir.

$$T = T_{\text{doyma, 850 kPa}} = 172.96 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Tablo A-5})$$

$$u = u_{\text{doyma, 850 kPa}} = 731.27 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tablo A-5})$$

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasındaki ilişkiyi, veren herhangi bir bağıntıya hal denklemi adı verilir. Bazıları basit bazıları çok karmaşık olan birçok hal denklemi vardır. Bu denklemlerden en basit ve en çok bilineni mükemmel gaz hal denklemidir. Bu denklem düşük yoğunluklardaki (düşük basınç, yüksek sıcaklıklardaki) gerçek gazların P-v-T ilişkisini oldukça hassas biçimde verir.

$$Pv = RT$$

Burada R gaz sabiti olarak adlandırılır ve birimi (kJ/kgK) dir. P mutlak basınç, T ise mutlak sıcaklıktır.

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

<u>Madde</u>	<u>$R, \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$</u>
Hava	0.2870
Helyum	2.0769
Argon	0.2081
Azot	0.2968

ŞEKİL 2-44

Değişik maddelerin farklı gaz sabitleri vardır.

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

Gaz sabiti R nin her gaz için farklı değeri vardır ve

$$R = \frac{R_u}{M} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \text{ veya } \text{kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})]$$

bağıntısından hesaplanır. M (kg/kmol veya gr/mol) söz konusu gazın mol kütlesi veya moleküler ağırlığıdır. R_u üniversal (evrensel) gaz sabiti olup değeri tüm maddeler için aynıdır.

$$R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

Mükemmel gaz denklemi birkaç değişik biçimde yazılabilir.

$$V = mv \rightarrow PV = mRT$$

$$mR = (Mn)R = nR_u \rightarrow PV = nR_u T$$

$$V = n \bar{v} \rightarrow P \bar{v} = R_u T$$

Burada n mol miktarı $\bar{v}$ mol özgül hacmi veya birim molün hacmidir.

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

Denklemler iki kez yazılıp sadeleştirilirse, bir mükemmel gazın iki değişik haldeki özellikleri arasında

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

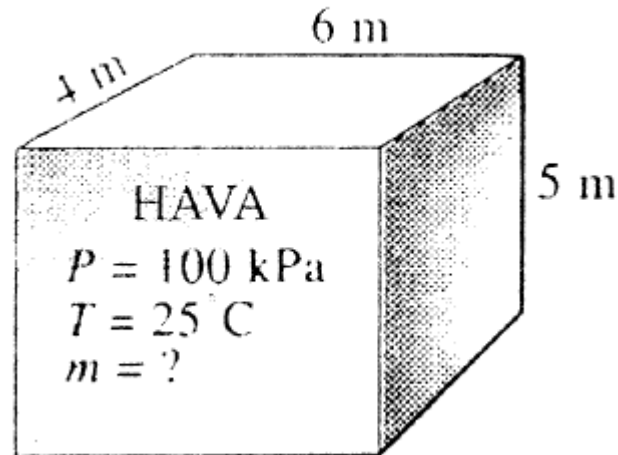
Bağıntısı yazılabilir.

Mükemmel (İdeal) Gaz Hal Denklemi

Uygulamada karşılaşılan sınırlar içinde, hava, azot, oksijen, hidrojen, helyum, argon, neon, kripton ve hatta karbondioksit gibi daha ağır gazlar %1 den daha az bir hatayla mükemmel gaz kabul edilebilir. Fakat buharlı güç santrallerindeki su buharı ve buzdolaplarındaki soğutucu akışkan buharları gibi yoğun gazlar, mükemmel gaz kabul edilmemelidir. Bu maddeler için özellik tabloları kullanılmalıdır.

ÖRNEK 10

4m x 5m x 6m boyutlarındaki bir odada bulunan 100 kPa basınç ve 25°C sıcaklıktaki havanın kütlesini hesaplayınız.



ÖRNEK 10

4m x 5m x 6m boyutlarındaki bir odada bulunan 100 kPa basınç ve 25°C sıcaklıktaki havanın kütlesini hesaplayınız.

Mutlak sıcaklık, $T = 25\text{ °C} + 273 = 298\text{ K}$ 'dir.

Odanın hacmi,

$$V = (4\text{m})(5\text{m})(6\text{m}) = 120\text{ m}^3$$

olarak hesaplanır ve bulunan değerler mükemmel gaz hal denkleminde yerine konarak, odadaki havanın kütlesi için

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(100\text{kPa})(120\text{m}^3)}{[0.287\text{kPa}\cdot\text{m}^3 / (\text{kg}\cdot\text{K})](298\text{K})} = 140.3\text{ kg}$$

değeri elde edilir.

Sıkıştırılabilme Çarpanı

Mükemmel gaz denklemi basit ve kullanışlıdır. Fakat daha önce de ifade edildiği gibi gazlar, kritik nokta ve doyma eğrisi yakınlarında mükemmel gaz davranışından önemli ölçüde uzaklaşırlar.

Verilen bir sıcaklık ve basınçta mükemmel gaz davranışından sapmayı ifade eden büyüklüğe sıkıştırılabilme çarpanı adı verilir.

$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$Pv = ZRT$$

$$Z = \frac{v_{\text{gerçek}}}{v_{\text{mükemmel}}}$$

Sıkıştırılabilme Çarpanı

Mükemmel gazlar için $Z=1$ 'dir. Gerçek gazlar için Z , 1'den büyük veya küçük olabilir. Z , 1'den ne kadar uzaklaşırsa mükemmel gaz davranışından sapma o kadar büyük olur.

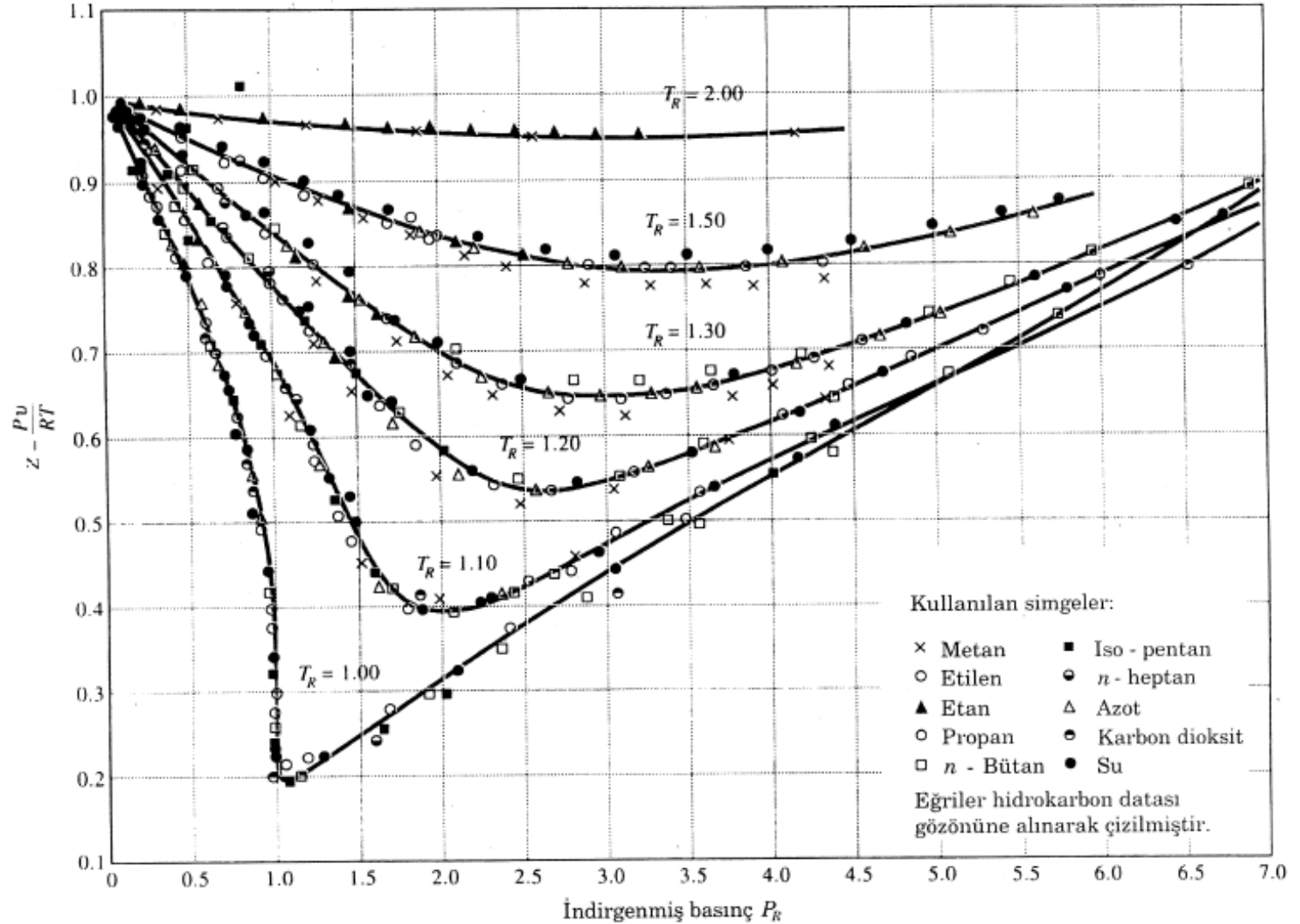
İndirgenmiş Sıcaklık ve İndirgenmiş Basınç

Değişik gazlar verilen bir basınç veya sıcaklıkta birbirinden farklı davranabilirler, fakat kritik sıcaklık ve basınçlarına göre indirgenmiş sıcaklık ve basınçlarda, davranışları birbirine benzer. **İndirgenmiş sıcaklık** T_R ve **indirgenmiş basınç** P_R aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad \text{ve} \quad T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad (2-20)$$

Sıkıştırılabilirlik çarpanı Z , aynı indirgenmiş sıcaklık ve basınçta tüm gazlar için yaklaşık olarak aynı değere sahiptir (Şekil 2-50). Bu olguya **karşılıklı haller ilkesi** adı verilir. Bazı gazlar için deneysel olarak bulunmuş Z değerleri Şekil 2-51'de P_R ve T_R 'nin fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

Değişik gazlar için Z çarpanları



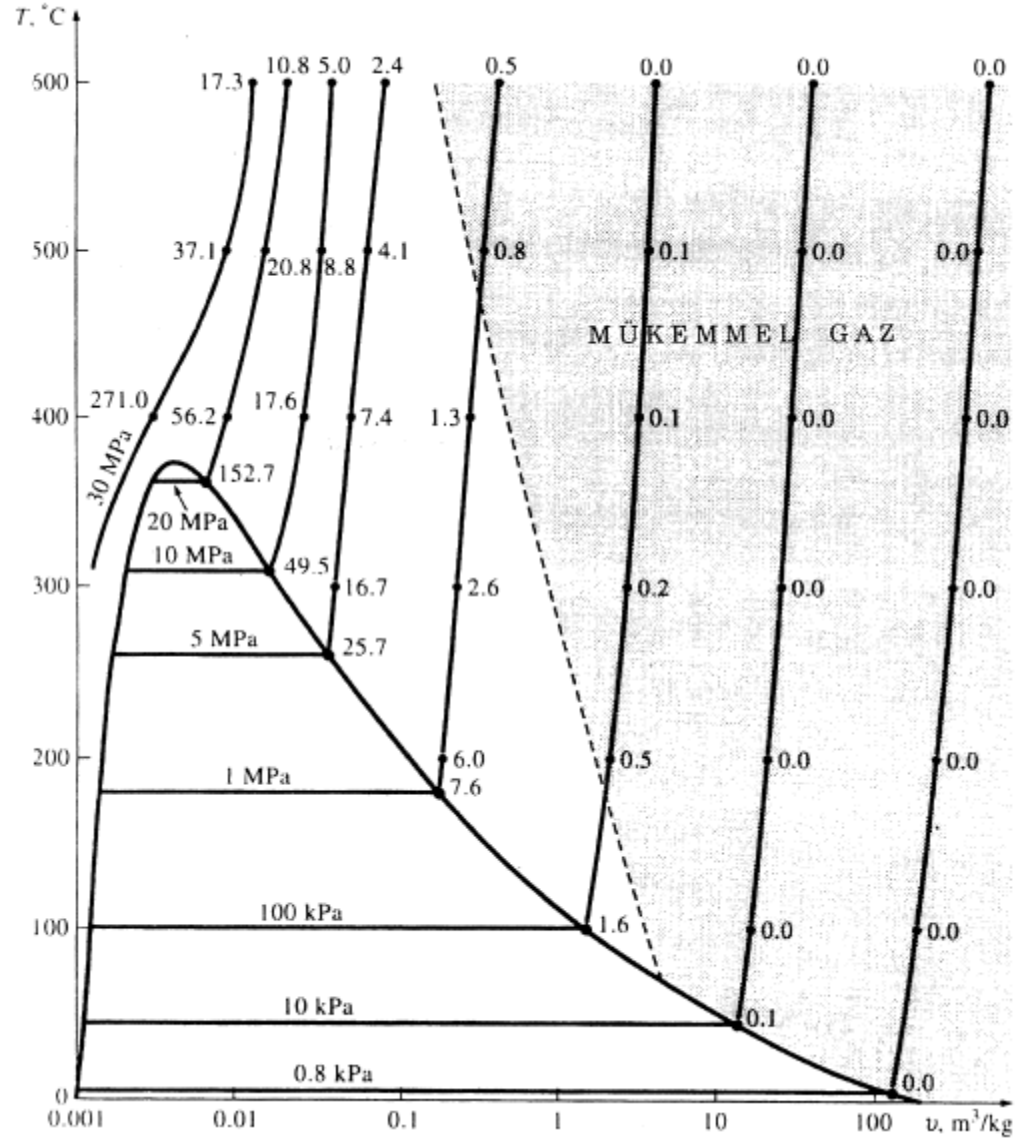
ŞEKİL 2-48

Su buharını mükemmel bir gaz kabul etmekten dolayı oluşan yüzde hata

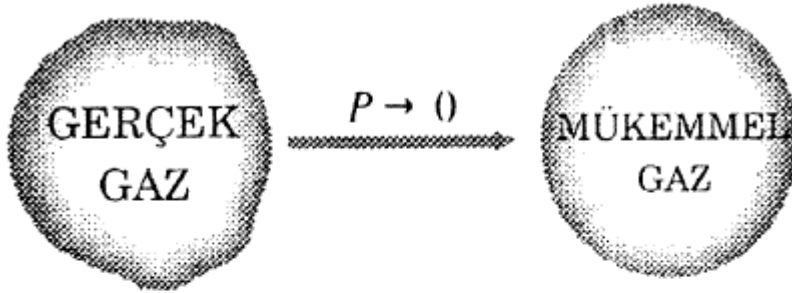
$$\left(\left| v_{\text{tablo}} - v_{\text{mükemmel}} \right| / v_{\text{tablo}} \right) \times 100$$

ve su buharının yüzde 1'den az hatayla mükemmel gaz kabul edilebileceği bölge.

1. Çok düşük basınçlarda ($P_R \ll 1$) gazlar sıcaklık ne olursa olsun mükemmel gaz gibi davranırlar.
2. Yüksek sıcaklıklarda ($T_R > 2$), basınç çok yüksek ($P_R \gg 1$) olmadığı sürece gazlar mükemmel gaz gibi davranırlar.
3. Mükemmel gaz davranışından uzaklaşma en çok kritik nokta yakınlarında olur.

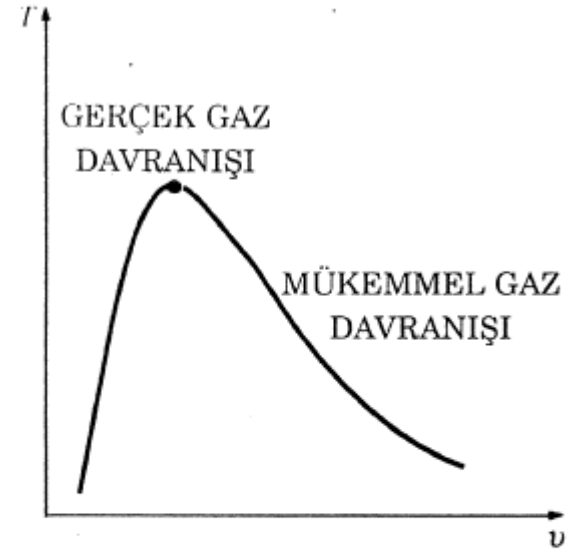


1. Çok düşük basınçlarda ($P_R \ll 1$) gazlar sıcaklık ne olursa olsun mükemmel gaz gibi davranırlar.
2. Yüksek sıcaklıklarda ($T_R \gg 2$), basınç çok yüksek ($P_R \gg 1$) olmadığı sürece gazlar mükemmel gaz gibi davranırlar.
3. Mükemmel gaz davranışından uzaklaşma en çok kritik nokta yakınlarında olur.



ŞEKİL 2-52

Çok düşük basınçlarda, sıcaklıkları ne olursa olsun tüm gazlar mükemmel gaz davranışına yaklaşırlar.



ŞEKİL 2-53

Kritik nokta yakınlarında gazlar mükemmel gaz davranışından uzaklaşırlar.

ÖRNEK 11

1 Mpa basınç ve 50 °C sıcaklıktaki soğutucu akışkan-12'nin özgül hacmini (a) soğutucu akışkan-12 tablolarını, (b) mükemmel gaz hal denklemini ve (c) genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik diyagramını kullanarak hesaplayın. Ayrıca (b) ve (c) şıklarındaki hatayı hesaplayın.

ÖRNEK 11

Çözüm Soğutucu akışkan-12'nin gaz sabiti, kritik basıncı ve kritik sıcaklığı Tablo A-1'den elde edilir:

$$R = 0.0688 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$P_{\text{cr}} = 4.01 \text{ MPa}$$

$$T_{\text{cr}} = 384.7 \text{ K}$$

(a) Verilen halde soğutucu akışkan-12'nin özgül hacmi Tablo A-13'ten bulunur:

$$P = 1 \text{ MPa} \quad \text{ve} \quad T = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \Rightarrow \quad v = 0.01837 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Bu değer deneyle bulunan değerdir ve en hassas olanıdır.

ÖRNEK 11

(b) Soğutucu akışkan-12'yi mükemmel gaz kabul ederek, özgül hacim 2-9 numaralı mükemmel gaz hal denkleminde hesaplanabilir:

$$v = \frac{RT}{P} = \frac{[0.0688 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})](323 \text{ K})}{1000 \text{ kPa}} = 0.02222 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Böylece, soğutucu akışkan-12'yi mükemmel gaz kabul ederek hesaplanan özgül hacimdeki hata $(0.02222 - 0.01837)/0.01837 = 0.208$ veya yüzde 20.8'dir.

ÖRNEK 11

(c) Sıkıştırılabilirlik diyagramından düzeltme çarpanı Z 'yi belirlemek için indirgenmiş basınç ve sıcaklığın hesaplanması gerekir:

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{1 \text{ MPa}}{4.01 \text{ MPa}} = 0.249$$

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{323 \text{ K}}{384.7 \text{ K}} = 0.840$$

Bu değerlerle Şekil A-30'dan $Z = 0.83$ bulunur. Böylece,

$$v = Zv_{\text{mükemmel}} = (0.83)(0.02222 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.01844 \text{ m}^3/\text{kg}$$

olur. Bu sonuçtaki hata yüzde 1'den azdır. Bu nedenle tablolara kolaylıkla erişilemediği durumlarda genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik diyagramı güvenle kullanılabilir.

P ve T yerine P ve v , veya T ve v verildiği zaman genelleştirilmiş sıkıştırılabilme diyagramı verilmeyen üçüncü özeliği hesaplamak için kullanılabilir, fakat deneme yanılma gerekecektir. Bu nedenle, **sanki-indirgenmiş özgül hacim** (v_R) adı verilen üçüncü bir indirgenmiş özellik tanımlanmıştır:

$$v_R = \frac{v_{\text{gerçek}}}{RT_{\text{cr}}/P_{\text{cr}}} \quad (2-21)$$

v_R 'nin P_R ve T_R 'den farklı bir biçimde tanımlandığı not edilmelidir. v_R , v_{cr} ile değil P_{cr} ve T_{cr} ile ilişkilidir. Sıkıştırılabilme diyagramlarında sabit v_R eğrileri de yer almaktadır. Bu şekilde T ve P 'yi hesaplamak için zaman alıcı deneme yanılma işlemine başvurma zorunluluğu ortadan kalkar (Şekil 2-54).

ÖRNEK 12

Sıcaklığı $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve özgül hacmi $0.03524\text{ m}^3/\text{kg}$ olan su buharının basıncını, (a) buhar tablolarını, (b) mükemmel gaz hal denklemini ve (c) sıkıştırılabilirlik diyagramını kullanarak belirleyin.

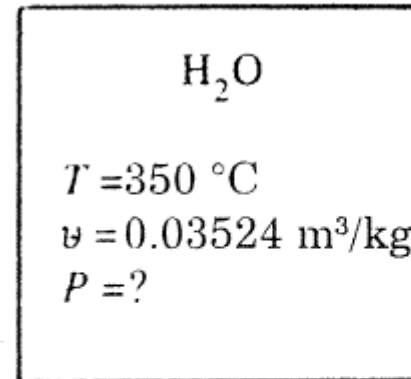
ÖRNEK 12

Çözüm Sistemin genel çizimi Şekil 2-55'te verilmiştir. Su buharının gaz sabiti, kritik basıncı ve kritik sıcaklığı Tablo A-1'den elde edilir:

$$R = 0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$P_{\text{cr}} = 22.09 \text{ MPa}$$

$$T_{\text{cr}} = 647.3 \text{ K}$$



ŞEKİL 2-55

Örnek 2-12 için genel çizim.

ÖRNEK 12

(a) Verilen halde su buharının basıncı Tablo A-6'dan bulunur:

$$v = 0.03524 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{ve} \quad T = 350 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad P = 7000 \text{ kPa}$$

Bu değer deneyle bulunan değerdir ve en hassas olanıdır.

(b) Su buharını mükemmel gaz kabul ederek, özgül hacim 2-9 numaralı mükemmel gaz hal denkleminde hesaplanabilir:

$$P = \frac{RT}{v} = \frac{[0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](623\text{K})}{0.03524 \text{ m}^3/\text{kg}} = 8158.8 \text{ kPa}$$

Böylece, su buharını mükemmel gaz kabul ederek hesaplanan basınçtaki hata $(8158.8 - 7000)/7000 = 0.142$ veya yüzde 14.2'dir.

ÖRNEK 12

(c) Sıkıştırılabilirlik diyagramından (Şekil A-30) düzeltme çarpanı Z 'yi belirlemek için sanki indirgenmiş özgül hacim ve indirgenmiş sıcaklığın hesaplanması gerekir:

$$v_R = \frac{v_{\text{gerçek}}}{R T_{\text{cr}} / P_{\text{cr}}} = \frac{(0.03524 \text{ m}^3/\text{kg})(22090 \text{ kPa})}{[0.4615 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](623 \text{ K})} = 2.7075$$

$$T_R = \frac{T}{T_{\text{cr}}} = \frac{623 \text{ K}}{647.3 \text{ K}} = 0.962$$

Bu değerleri kullanarak, Şekil A-30'dan $P_R = 0.31$ bulunur. Böylece,

$$P = P_R P_{\text{cr}} = (0.31)(22090 \text{ kPa}) = 6847.9 \text{ kPa}$$

olur. Sıkıştırılabilirlik diyagramının kullanımı hatanın yüzde 14.2'den yüzde 2.17'ye inmesini sağlamıştır (Şekil 2-56). Bu hata çoğu mühendislik uygulamasında kabul edilebilir bir hatadır. Doğal olarak, daha büyük bir diyagram daha hassas okuma yapabilmemizi sağlayacaktır. Dikkat edilirse, P_R sıkıştırılabilirlik diyagramından doğrudan okunabildiği için, Z 'nin ayrıca bulunmasına gerek kalmamıştır.

Diğer Hal Denklemleri

Mükemmel gaz hal denklemi basit olmakla birlikte kullanım alanı sınırlıdır. Maddelerin P-v-T davranışlarını daha geniş sınırlar içinde herhangi bir kısıtlama olmadan ifade eden hal denklemlerine ihtiyaç duyulur. Bu amaçla önerilen çok sayıda denklem vardır, fakat bunlardan üçü önemlidir.

Diğer Hal Denklemleri

Van der Waals denklemi, bu denklemler içinde en eski bir denklemdir.

Beattie-Bridgeman denklemi hassa sonuçlar veren ve bilinen bir denklemdir.

Benedict-Webb-Rubin denklemi ise hem en yenilerden biri hem de çok hassas olan bir denklemdir.

Van der Waals Hal Denklemi

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad a, b: \text{deneysel sabitler}$$

Van der Waals denklemi, mükemmel gaz hal denkleminde göz önüne alınmayan iki etkiyi hesaba katarak, mükemmel gaz hal denklemini iyileştirir. Bunlar molekülleri birbirine çeken kuvvetler ve moleküllerin kapladığı hacimdir.

Denklemdeki a/v^2 terimi moleküller arasındaki kuvvetleri, b ise moleküllerin kapladığı hacmi hesaba katar.

Van der Waals Hal Denklemi

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad a, b: \text{deneysel sabitler}$$

Van der Waals denkleminin hassaslığı genellikle yetersizdir. Tarihi önemi vardır.

Beattie-Bridgeman Hal Denklemi

1928 yılında önerilen **Beattie-Bridgeman denklemi**, deneysel olarak saptanan beş sabite dayalı bir denklemdir.

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) \quad \text{and} \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}} \right)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan sabitlerin değişik maddeler için değerleri Tablo A29a'da verilmiştir.

Benedict-Webb-Rubin Hal Denklemi

Benedict-Webb-Rubin hal denklemi içerisinde sekiz sabit yer alan daha hassas bir hal denklemidir.

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b R_u T - a}{\bar{v}^3} + \frac{a \alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right) e^{-\gamma/\bar{v}^2}$$

Denklemde yer alan sabitlerin değerleri Tablo A29b'de verilmiştir.