

Chapter 3

SAF MADDENİN ÖZELLİKLERİ

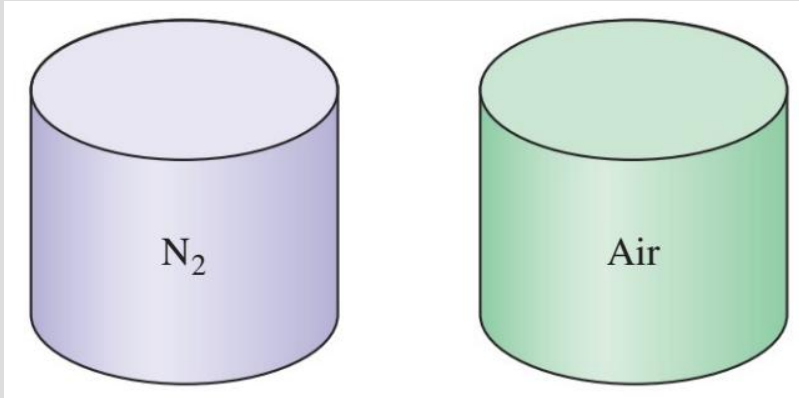
Ceyhun Yılmaz
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Objectives

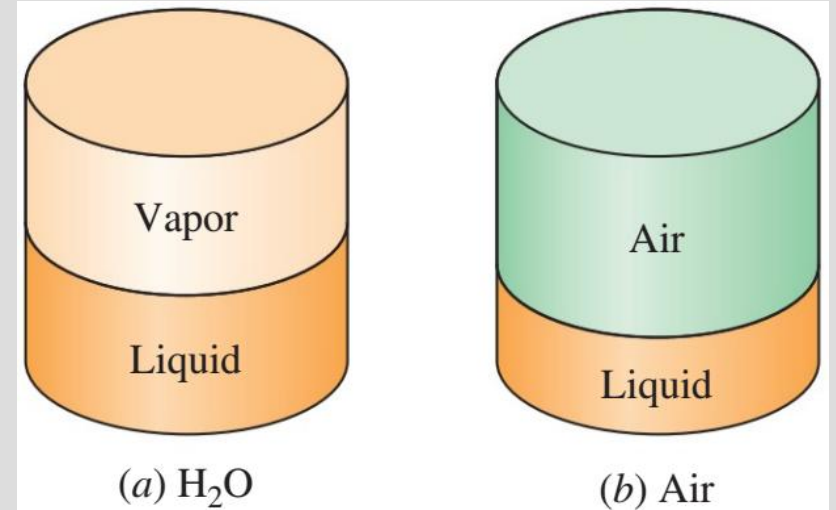
- Saf madde kavramının tanıtılması.
- Faz değişimi işleminin fizik ilkelerinin incelenmesi.
- Saf maddenin P - v - T yüzeylerinin ve P - v , T - v ve P - T özellik diyagramlarının gösterimi.
- Özellik veri tablolarından saf maddenin termodinamik özelliklerin belirlenmesi için izlenecek yolun gösterimi.
- Sanal bir madde olarak mükemmel gaz ve mükemmel gaz hal denkleminin tanımını yapmak.
- Özgün problemlerin mükemmel gaz hal denklemi ile çözümünün uygulanması.
- Gerçek gazların mükemmel gaz davranışından farklılığının bir ölçüsü olan sıkıştırılma çarpanı tanımlanması.
- Yaygın olarak bilinen diğer hal denklemlerinin verilmesi.

SAF MADDE

- **Saf madde:** Her noktasında aynı ve değişmeyen bir kimyasal bileşime sahip olan maddeye denir.
- Hava değişik gazlardan oluşan bir karışımıdır, kimyasal bileşiminin her noktada aynı ve değişmez olmasından dolayı saf maddedir.

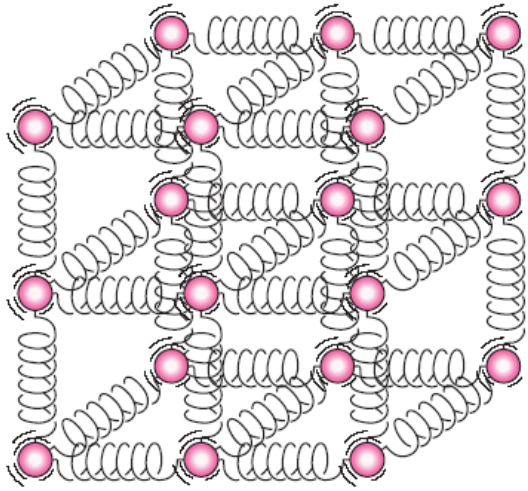


Azot ve gaz halindeki hava saf maddelerdir.

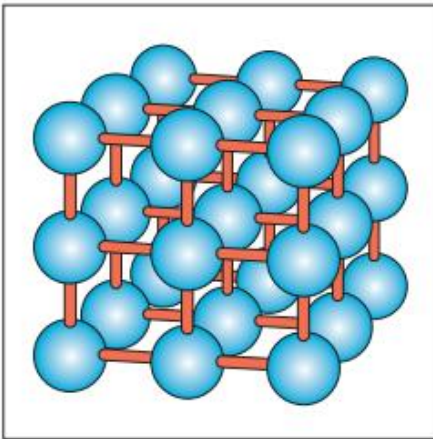


Sıvı-buhar karışımı su saf bir maddedir, ama sıvı ve gaz havanın karışımı saf bir madde değildir.

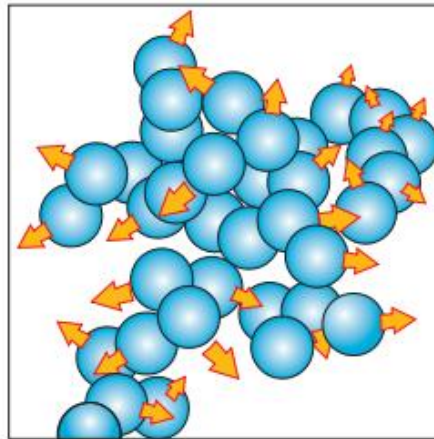
SAF MADDENİN FAZLARI



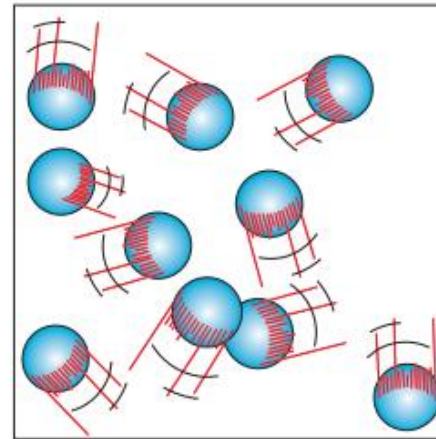
Katı bir cismi oluşturan moleküller, yay benzeri moleküller arası kuvvetlerle yerlerinde tutulurlar.



(a)



(b)



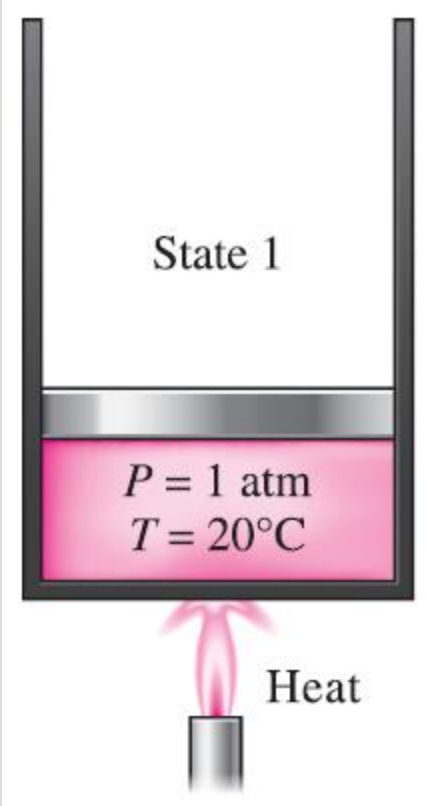
(c)

Atomların farklı fazlardaki düzenleri: (a) bir katıdaki moleküller nispeten sabittir, (b) sıvı fazda molekül grupları birbirleri etrafında hareket ederler ve (c) gaz fazında moleküller rastgele hareket ederler.

Bir katıda, moleküller arasındaki itici ve çekici güçler, molekülleri nispeten birbirinden aynı uzaklıklarda tutma eğilimindedirler.

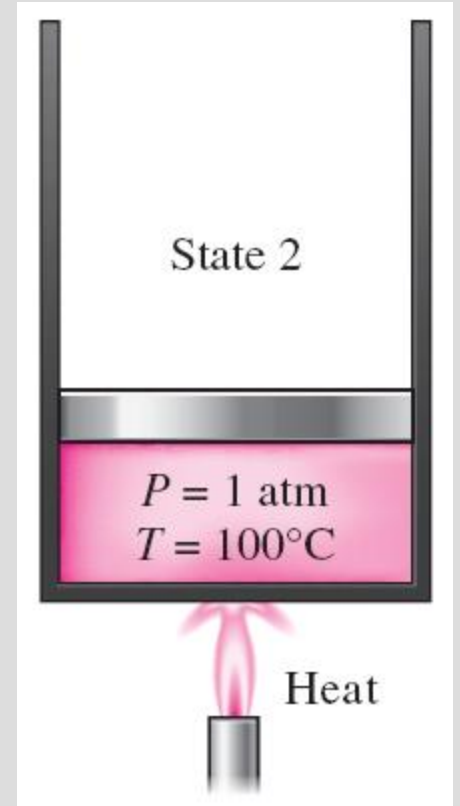
SAF MADDELERİN FAZ DEĞİŞİM İŞLEMLERİ

- **Sıkıştırılmış sıvı (soğutulmuş sıvı):** Henüz buharlaşma aşamasına gelmediği bir durumdur.
- **Doymuş sıvı:** Buharlaşma başlangıcı olan hale denir.

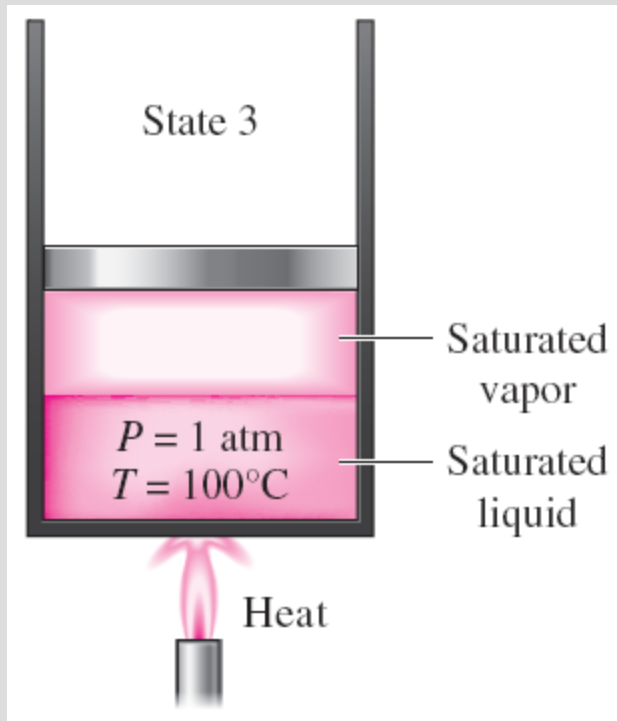


1 atm basınçta ve 20 °C sıcaklıkta su sıvı fazındadır (**sıkıştırılmış sıvı**).

1 atm basınçta ve 100 °C sıcaklıkta su buharlaşma başlangıcındadır (**doymuş sıvı**).



- **Doymuş buhar:** Yoğuşmanın sınırında olan buhar.
- **Doymuş sıvı-buhar karışımı:** Bu durumda sıvı ve buhar fazları bir arada ve dengede bulunur.
- **Kızgın buhar:** Yoğuşma sınırında olmayan (yani doymuş buhar gibi değil) buhara denir.



Daha fazla ısı transfer edildiğinde doymuş sıvının bir bölümü buharlaşır (**doymuş sıvı-buhar karışımı**).

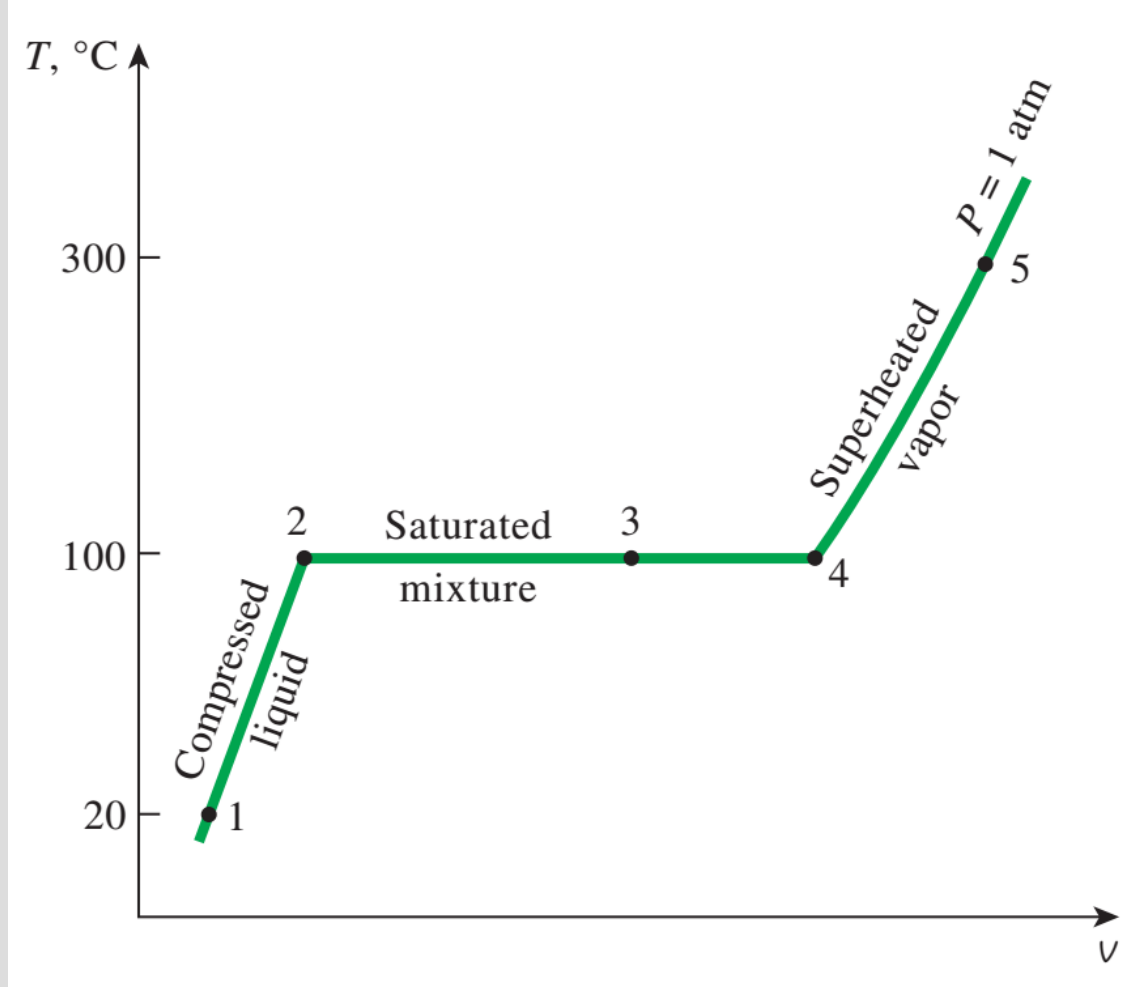


1 atm basınçta sıvının son damlası da buharlaşınca kadar sıcaklık 100°C 'de sabit kalır (**doymuş buhar**).



Daha fazla ısı transfer edildiğinde buharın sıcaklığı artmaya başlar (**kızgın buhar**).

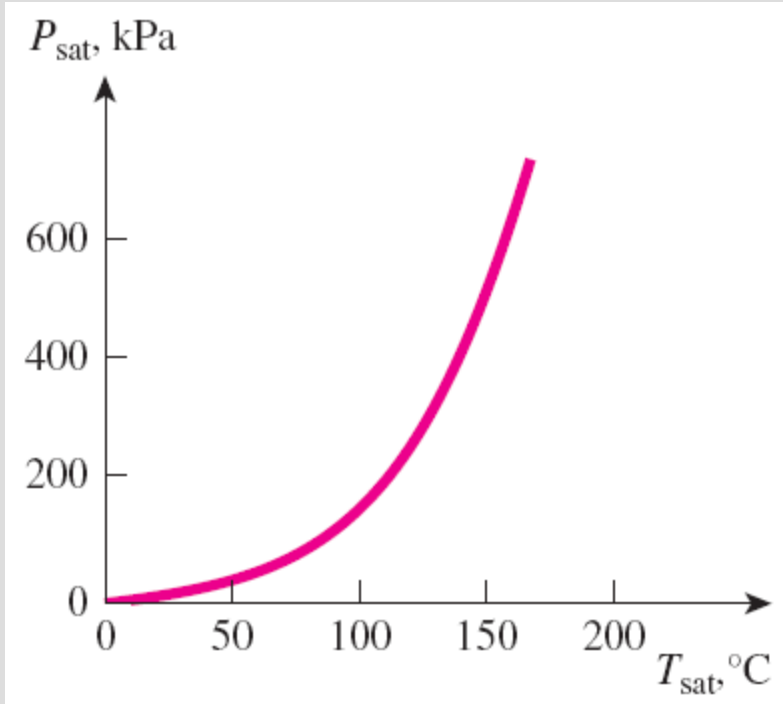
Burada izah edilen hal değişiminin tamamı bu kez su sabit basınçta soğutularak tersine çevrilirse, su benzer bir yol izleyerek, başka bir deyişle aynı hallerden geçerek, yeniden 1 haline dönecektir. Bu hal değişimi sırasında açığa çıkan ısının miktarı, ısıtma işlemi sırasında eklenen ısının miktarına tamamen eşit olacaktır.



Sabit basınçta suyun ısıtılmasının T-v diyagramında gösterimi.

Doyma Sıcaklığı ve Doyma Basıncı

- Suyun kaynamaya başladığı sıcaklık basınca bağlıdır, bu nedenle sabitlenmiş bir basınçta kaynama sıcaklığı da belirli bir değere sahiptir.
- Su 1 atm basınçta 100°C de kaynar.
- **Doyma sıcaklığı T_{doyma}** : Verilen bir basınçta saf maddenin faz değişimlerine başladığı sıcaklıktır.
- **Doyma basıncı P_{doyma}** : Verilen bir sıcaklıkta, saf maddenin faz değişimlerine başladığı basınçtır.



Saf bir maddenin sıvı-buhar doyma eğrisi (sayısal değerler su için verilmiştir).

TABLE 3-1

Saturation (boiling) pressure of water at various temperatures

Temperature, T , °C	Saturation pressure, P_{sat} , kPa
-10	0.26
-5	0.40
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.39
50	12.35
100	101.4
150	476.2
200	1555
250	3976
300	8588

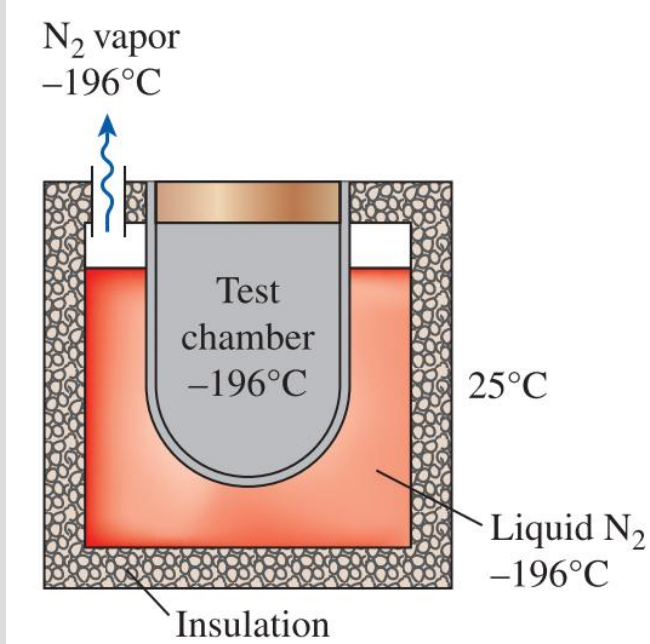
- **Gizli ısı:** Faz değişimi süreci boyunca alınan veya verilen enerjinin miktarı.
- **Gizli füzyon ısısı:** erime süresince emilen enerjinin miktarına denir ve donma süresince ortama verilen enerjiye eşittir.
- **Gizli buharlaşma ısısı:** Buharlaşma süresince çekilen enerjiye gizli buharlaşma ısısı denir ve yoğunlaşma sırasında açığa çıkan enerjiye eşittir.
- Gizli ısının büyüklüğü faz değişimlerinin olduğu sıcaklığa veya basınca bağlıdır.
- 1 atm basınçta suyun gizli füzyon ısısı 333.7 kJ/kg ve gizli buharlaşmanın ısısı 2256.5 kJ/kg dır.
- Atmosfer basıncı ve dolayısıyla suyun kaynama sıcaklığı yükseklikle azalır.

TABLE 3–2

Variation of the standard atmospheric pressure and the boiling (saturation) temperature of water with altitude

Elevation, m	Atmospheric pressure, kPa	Boiling temperature, °C
0	101.33	100.0
1,000	89.55	96.5
2,000	79.50	93.3
5,000	54.05	83.3
10,000	26.50	66.3
20,000	5.53	34.7

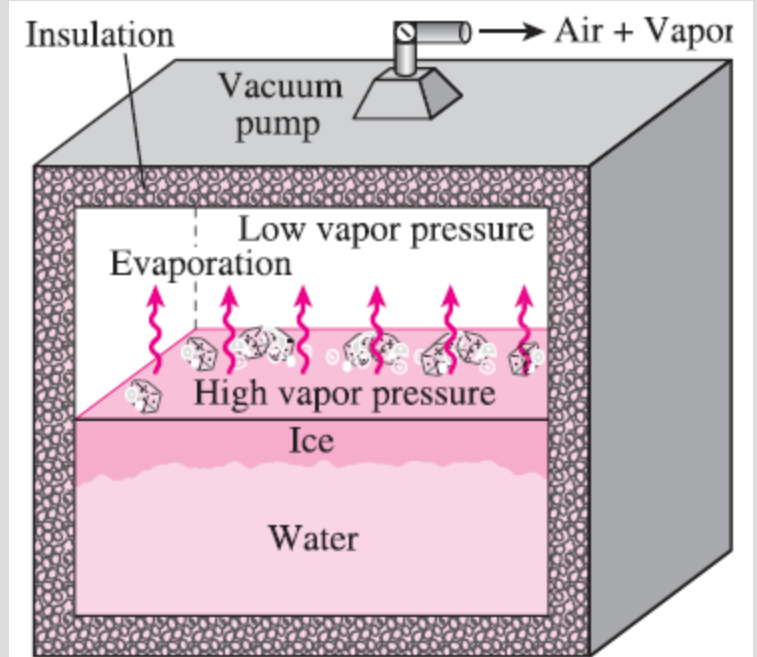
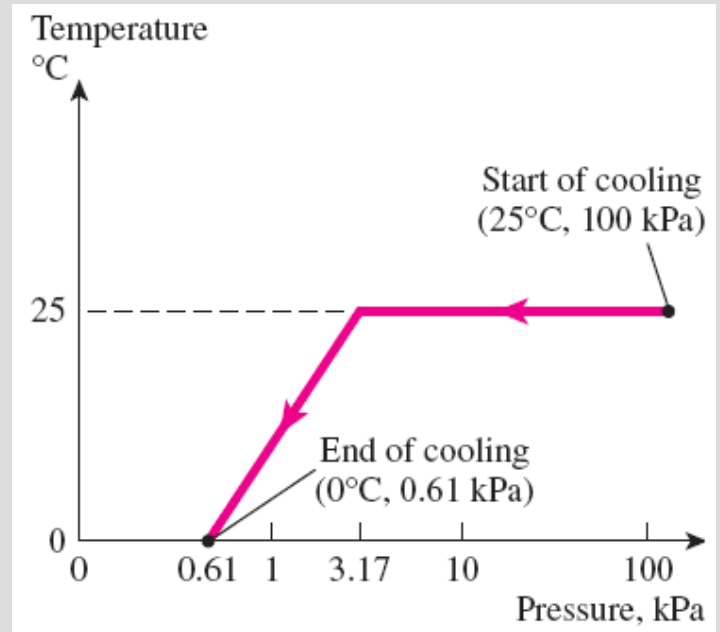
T_{doyma} ve P_{doyma} Bağımlılığının Bazı Sonuçları



Atmosfere maruz kalan sıvı azotun sıcaklığı $-196^\circ C$ 'de sabit kalır ve böylece test odasının sıcaklığı da $-196^\circ C$ olarak kalır.

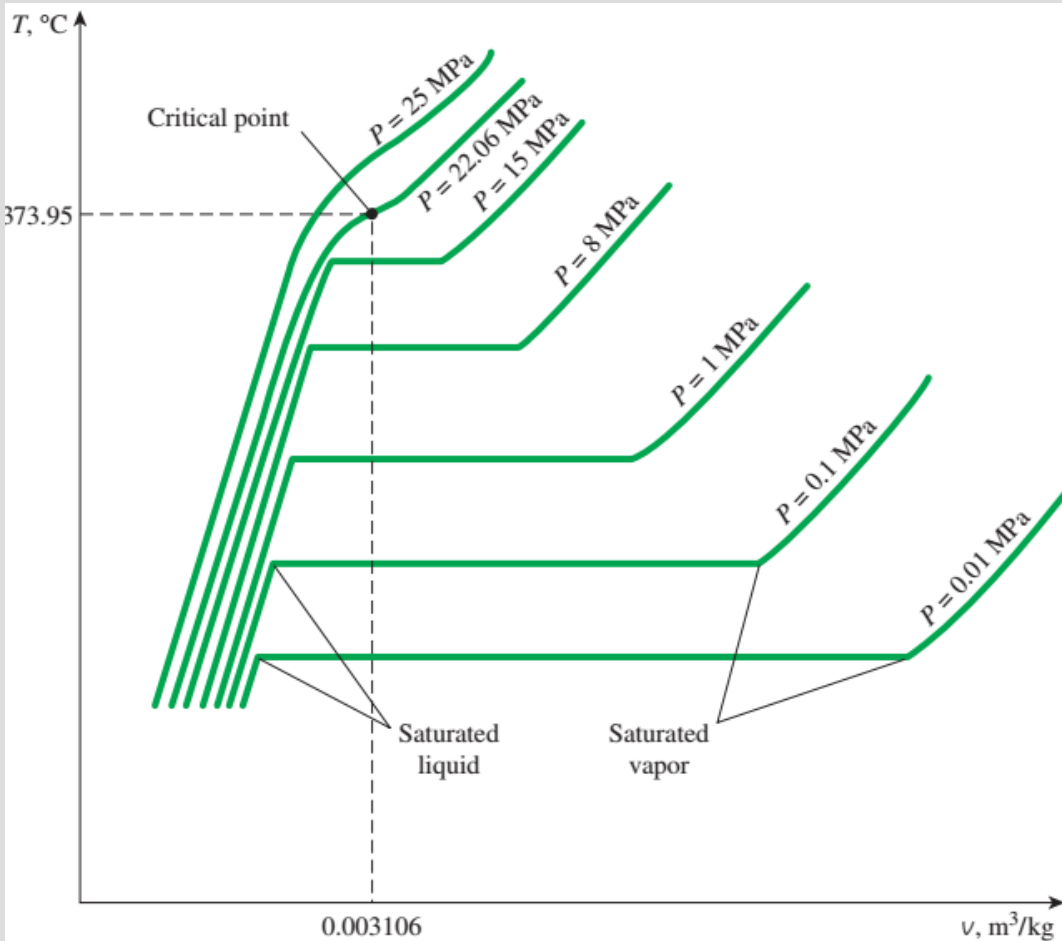
$25^\circ C$ 'den $0^\circ C$ 'ye vakumlu soğutma süresince sebze ve meyvelerin basınçla sıcaklık değişimleri.

1775 yılında su tankındaki hava boşaltılarak buz elde edildi.



FAZ DEĞİŞİMİ İŞLEMLERİ İÇİN ÖZELİK DİYAGRAMLARI

Özelik diyagramlarının kullanılması faz değişiminin gerçekleştiği hal değişimleri sırasında, özelliklerin nasıl değiştiğini anlamak ve izlemek bakımından çok yararlıdır. Bir sonraki kısımda saf madde için T-v, P-v, ve P-T diyagramları geliştirilmiş ve açıklanmıştır.



Değişik basınçlarda, saf bir maddenin sabit basınçta faz değişim eğrilerinin T-v diyagramında gösterimi (*sayısal değerler su içindir*).

- Doymuş sıvı çizgisi
- Doymuş buhar çizgisi
- Sıkıştırılmış sıvı çizgisi
- Kızgın buhar bölgesi
- Sıkıştırılmış sıvı-buhar karşım bölgesi (ıslak buhar)

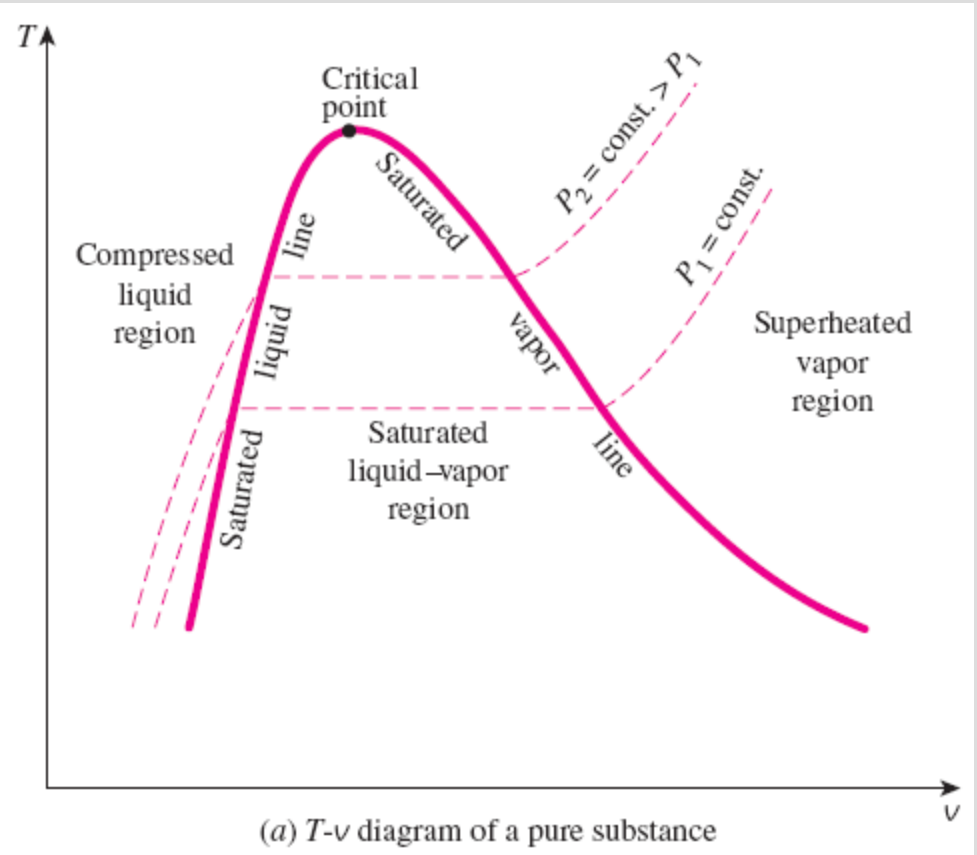
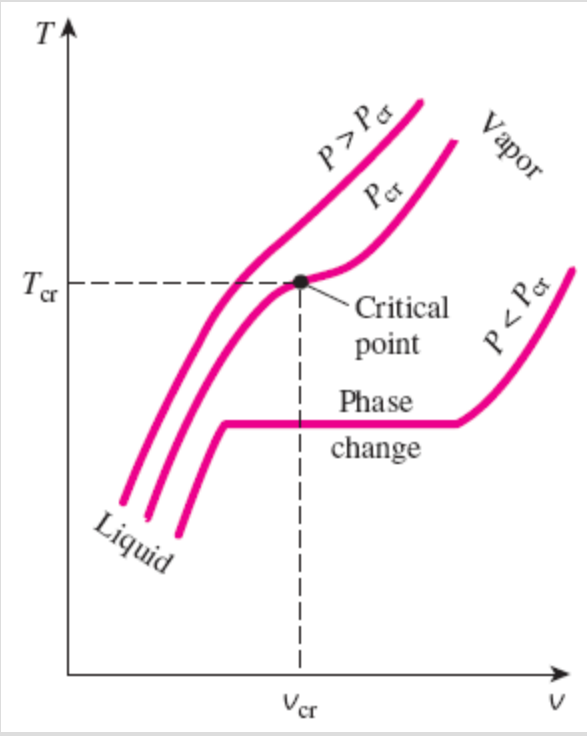
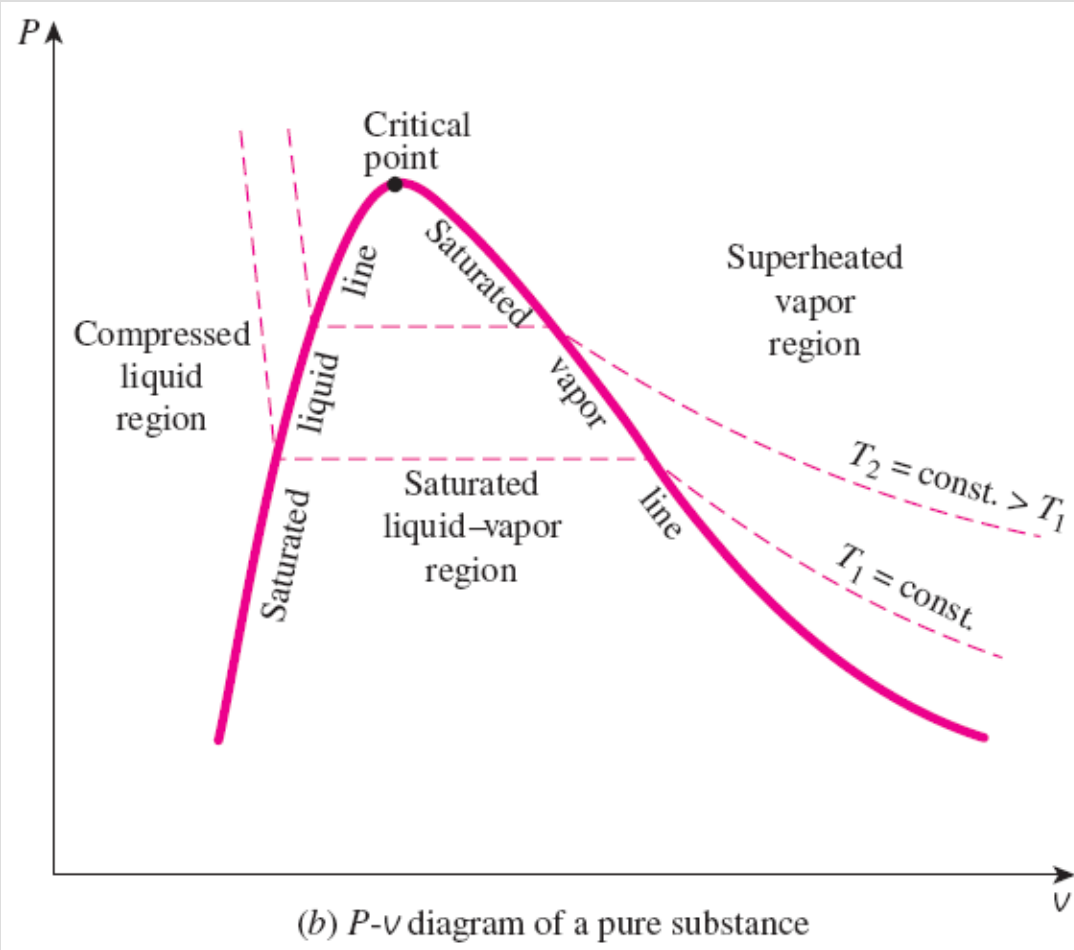


FIGURE 2.10
Saf bir maddenin T - v diyagramı

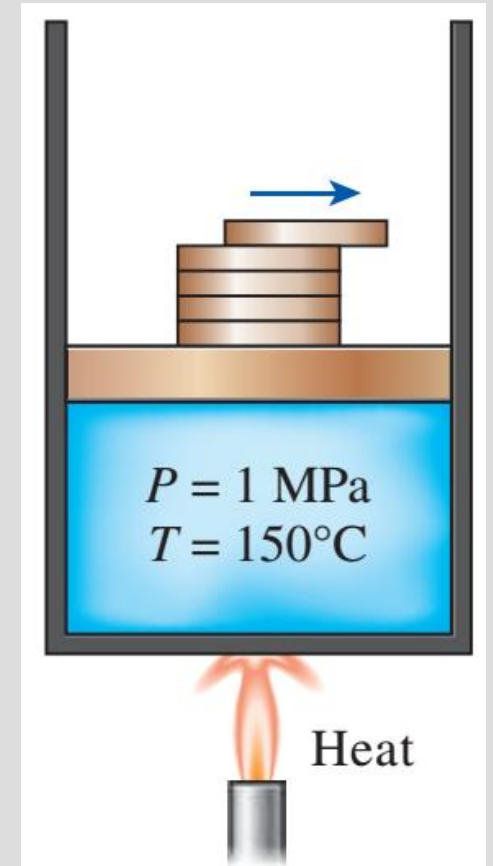


Kritik noktanın üzerindeki basınçlarda ($P > P_{cr}$), farklı bir faz değişim (kaynama) süreci yoktur.

Kritik nokta: Doymuş sıvıyla doymuş buhar hallerinin aynı olduğu hal.



Saf bir maddenin P - v diyagramı



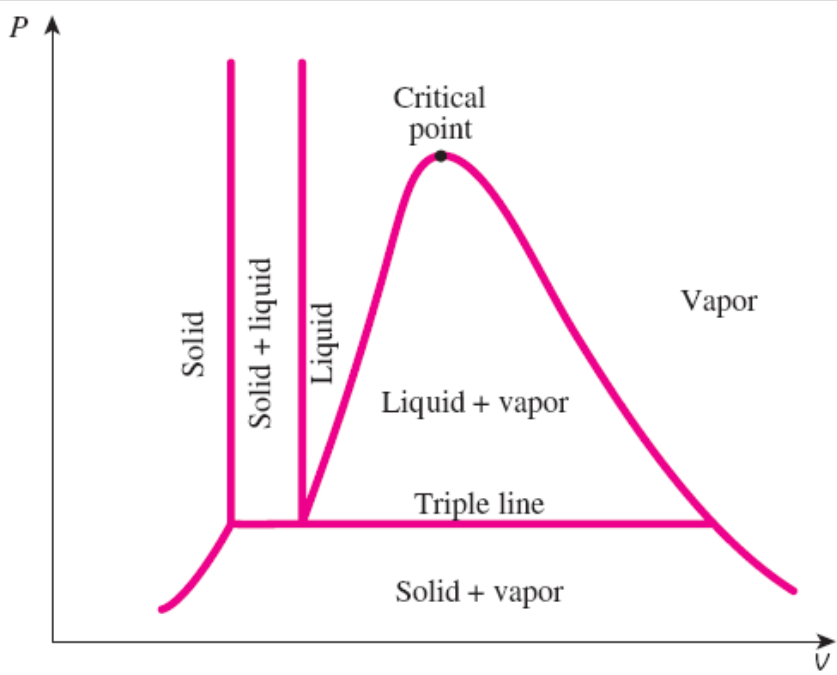
Bir piston silindir düzeneğindeki basınç, pistonun ağırlığı azaltılarak düşürülebilir.

Diyagramların Katı Fazıyla Beraber Genişletilmesi

For water,
 $T_{tp} = 0.01^{\circ}\text{C}$
 $P_{tp} = 0.6117 \text{ kPa}$

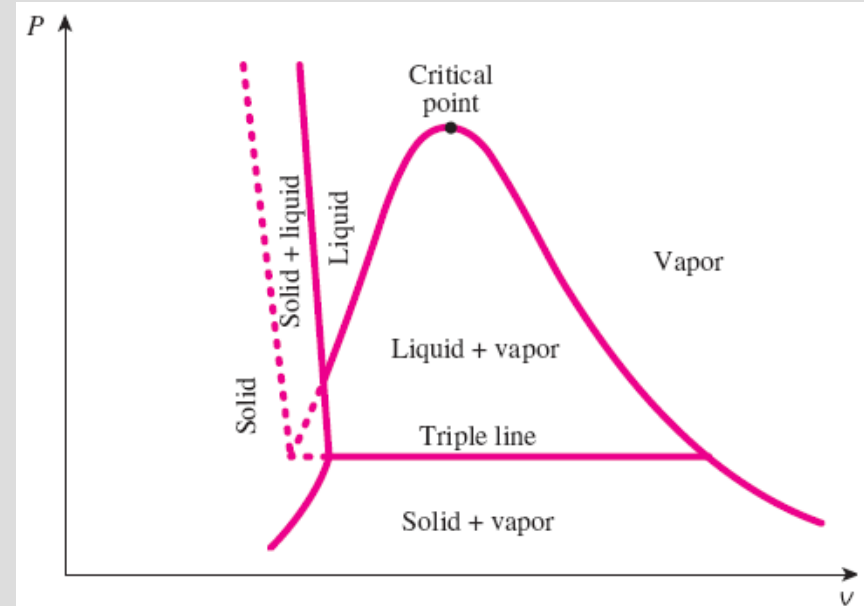


Bir madde üçlü nokta basınç ve sıcaklığında üç fazı denge durumunda bulunur.



(a) P - v diagram of a substance that contracts on freezing

Donarken hacmi küçülen bir maddenin P - v diyagramı



Donarken genişleyen (su gibi) bir maddenin P - v diyagramı

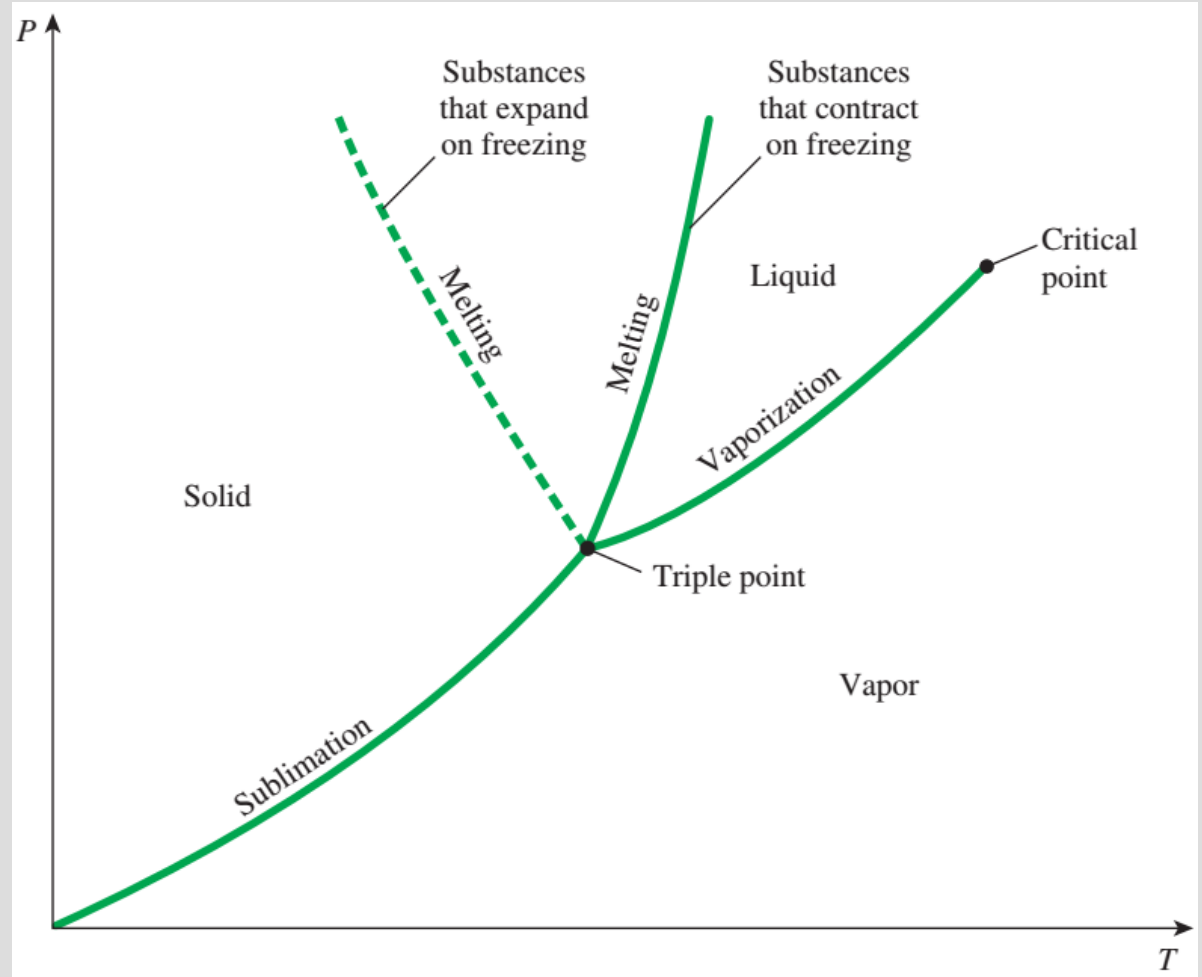
Süblimasyon:

Katı fazından doğrudan buhar fazına geçiş.



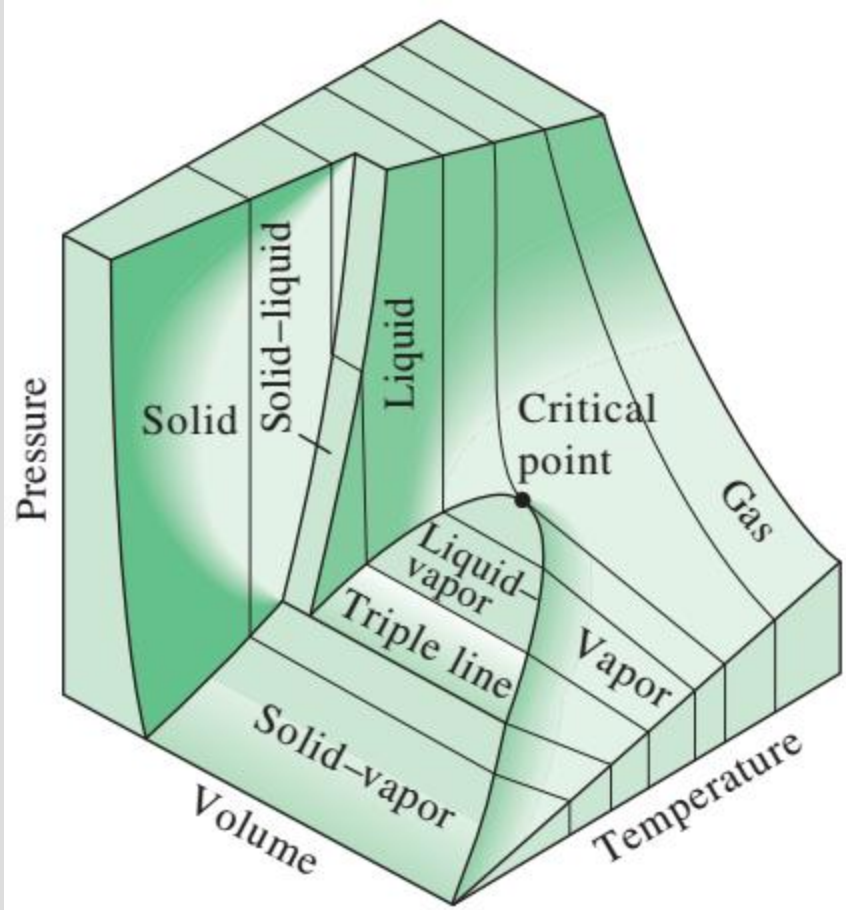
Düşük basınçlarda (üçlü nokta basıncının altında) katılar sıvı fazından geçmeden buharlaşır (süblimasyon).

Phase Diagram

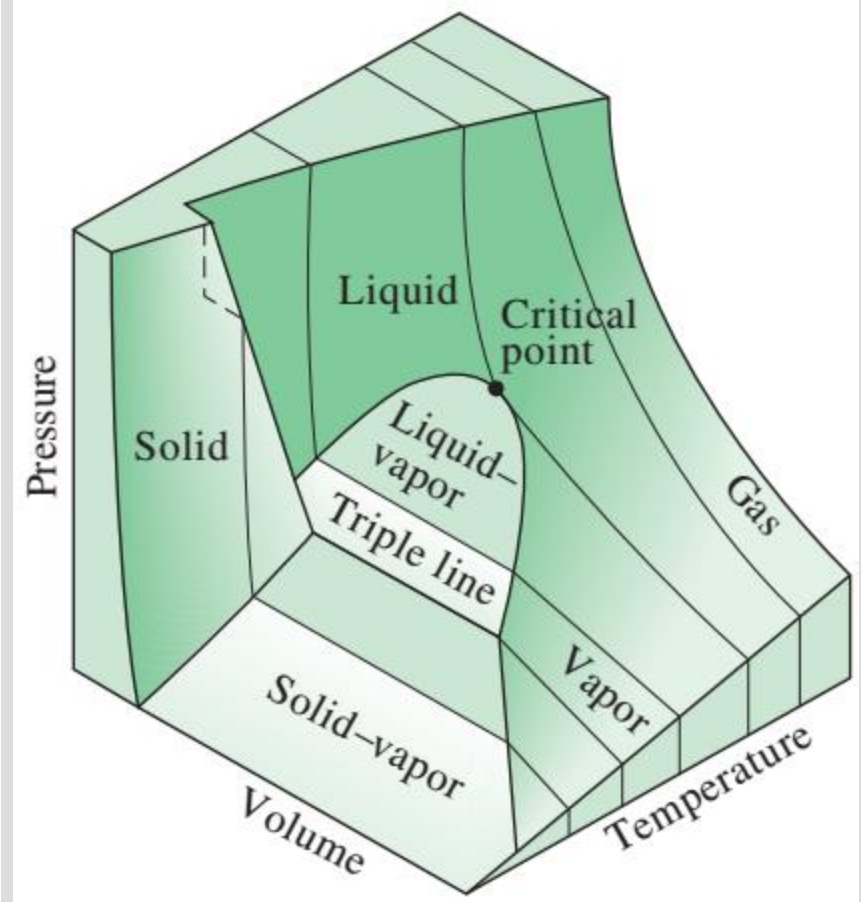


Saf maddelerin P - T diyagramı.

P-v-T yüzeyleri bir bakışta büyük miktarda bilgi sağlar, fakat termodinamik analizlerde P-v ve T-v diyagramlarıyla çalışmak çok daha uygundur.



Donarken hacmi küçülen bir maddenin P-v-T yüzeyi



Donarken genişleyen (su gibi) bir maddenin P-v-T yüzeyi

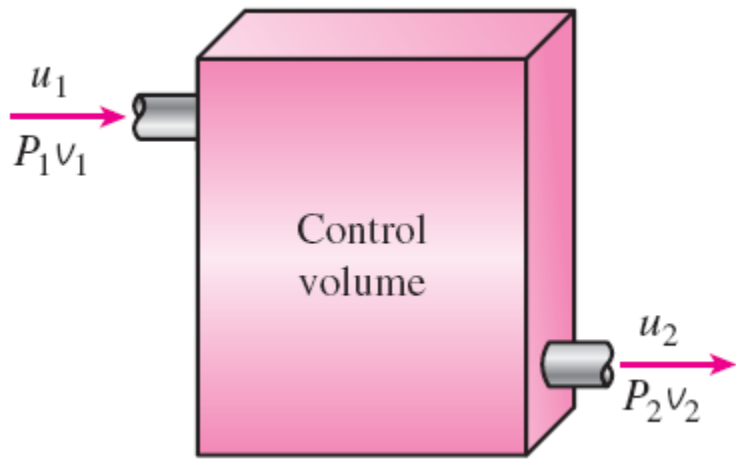
ÖZELİK TABLOLARI

- Birçok madde için termodinamik özellikler arasındaki ilişkiler basit denklemlerle ifade edilemeyecek kadar karmaşıktır.
- Bu nedenle özellikler genellikle tablolar aracılığıyla verilir.
- Bazı termodinamik özellikler kolaylıkla ölçülebilir, fakat bazıları da doğrudan ölçülemez. Bu özellikler, ölçülebilen özelliklerle aralarındaki ilişkiyi veren bağıntılardan hesaplanır.
- Ölçümler ve daha sonra bunlara dayanarak yapılan hesaplar kolaylıkla kullanılabilen tablolarla sunulur.

Entalpi- Bir Karma Özellik

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

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



$u + Pv$ 'nin kombinasyonuna kontrol hacimlerinin çözümlemesinde sıklıkla karşılaşılr.

A yellow sticky note with a red border and green corner tabs. It contains the following conversion factors:

$\text{kPa} \cdot \text{m}^3$	\equiv	kJ
$\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$	\equiv	kJ/kg
$\text{bar} \cdot \text{m}^3$	\equiv	100 kJ
$\text{MPa} \cdot \text{m}^3$	\equiv	1000 kJ
$\text{psi} \cdot \text{ft}^3$	\equiv	0.18505 Btu

Basınç x Hacim çarpımı enerji birimini verir.

Doymuş Sıvı ve Doymuş Buhar Halleri

- **Tablo A-4:** Suyun doymuş sıvı ve doymuş buhar özellikleri doyma sıcaklığına göre.
- **Tablo A-5:** Suyun doymuş sıvı ve doymuş buhar özellikleri doyma basıncına göre.

Tablo A-4'ün bir bölümü.

Temp. °C T	Sat. press. kPa P_{sat}	Specific volume m^3/kg	
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g
85	57.868	0.001032	2.8261
90	70.183	0.001036	2.3593
95	84.609	0.001040	1.9808

Specific temperature

Corresponding saturation pressure

Specific volume of saturated liquid

Specific volume of saturated vapor

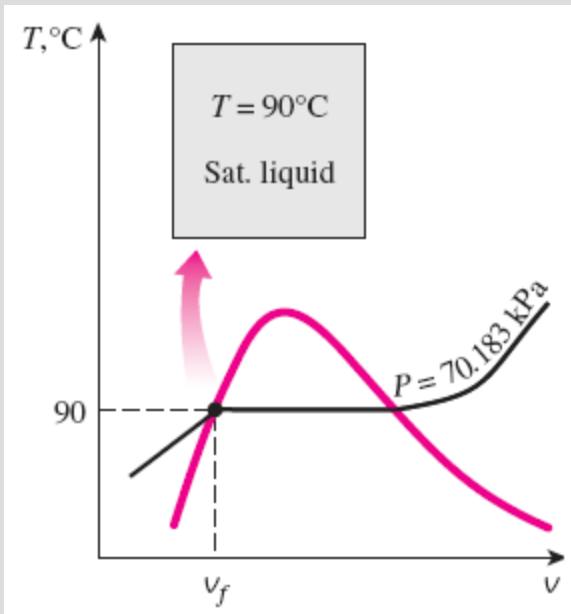
v_f = specific volume of saturated liquid

v_g = specific volume of saturated vapor

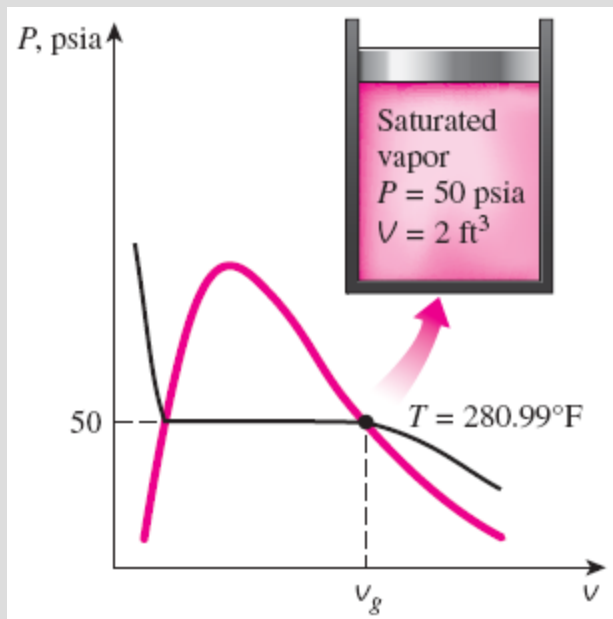
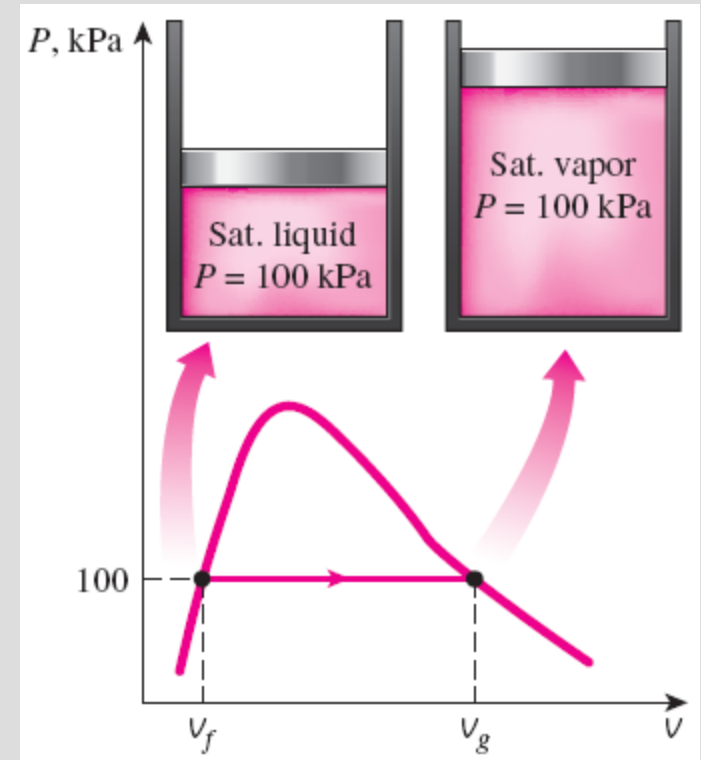
v_{fg} = difference between v_g and v_f (that is, $v_{fg} = v_g - v_f$)

Buharlaştırma entalpisi, h_{fg}

(Buharlaştırma gizli ısı): verilen bir basınç veya sıcaklıkta doymuş sıvının birim kütle için buharlaştırmak için gereken enerjidir.



Examples:
Saturated liquid and saturated vapor states of water on T - v and P - v diagrams.



Doymuş Sıvı-Buhar Karışımı

Kuruluk derecesi, x : karışımdaki sıvı ve buhar fazlarının oranı.

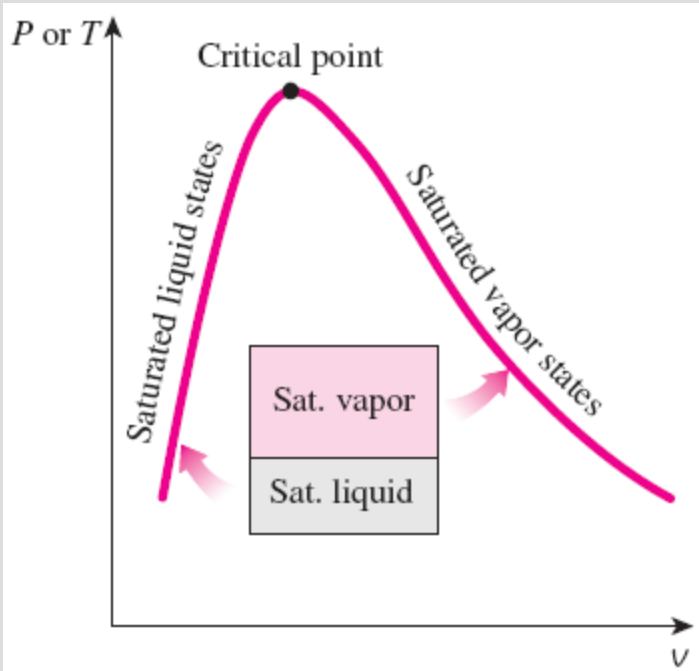
Değeri her zaman 0 ile 1 arasındadır. Doymuş sıvı halinde 0. Doymuş buhar halinde 1' dir.

Doymuş sıvının özelliklerinin, tek başına da olsa, doymuş buharla bir karışım içinde de olsa değişmediği vurgulanmalıdır.

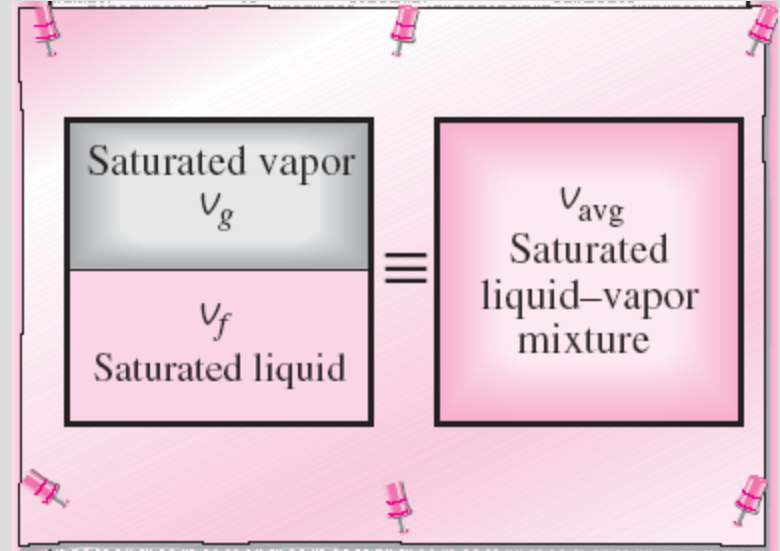
$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

$$m_{\text{total}} = m_{\text{liquid}} + m_{\text{vapor}} = m_f + m_g$$

Temperature and pressure are dependent properties for a mixture.



Doymuş bir karışımdaki sıvı ve buhar miktarları, **kuruluk derecesiyle, x** , gösterilir.



İki fazlı bir sistem uygunluk için homojen bir karışım gibi davranabilir.

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

$$x = m_g/m_t \quad x = \frac{v_{\text{avg}} - v_f}{v_{fg}}$$

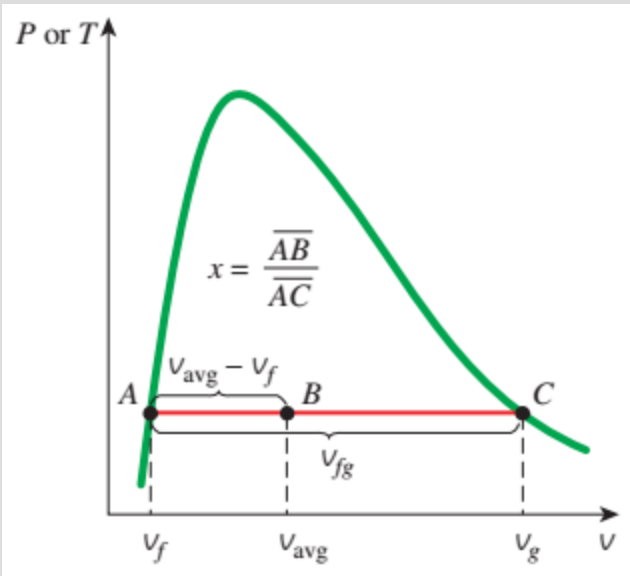
$$u_{\text{avg}} = u_f + xu_{fg} \quad (\text{kJ/kg})$$

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

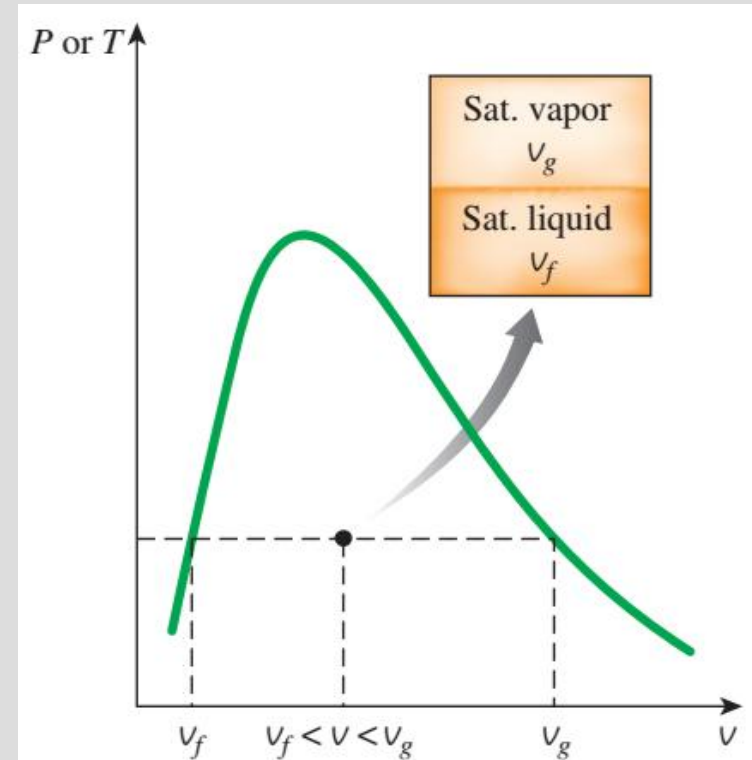
$y \rightarrow v, u, \text{ or } h.$

$$y_{\text{avg}} = y_f + xy_{fg}$$

$$y_f \leq y_{\text{avg}} \leq y_g$$

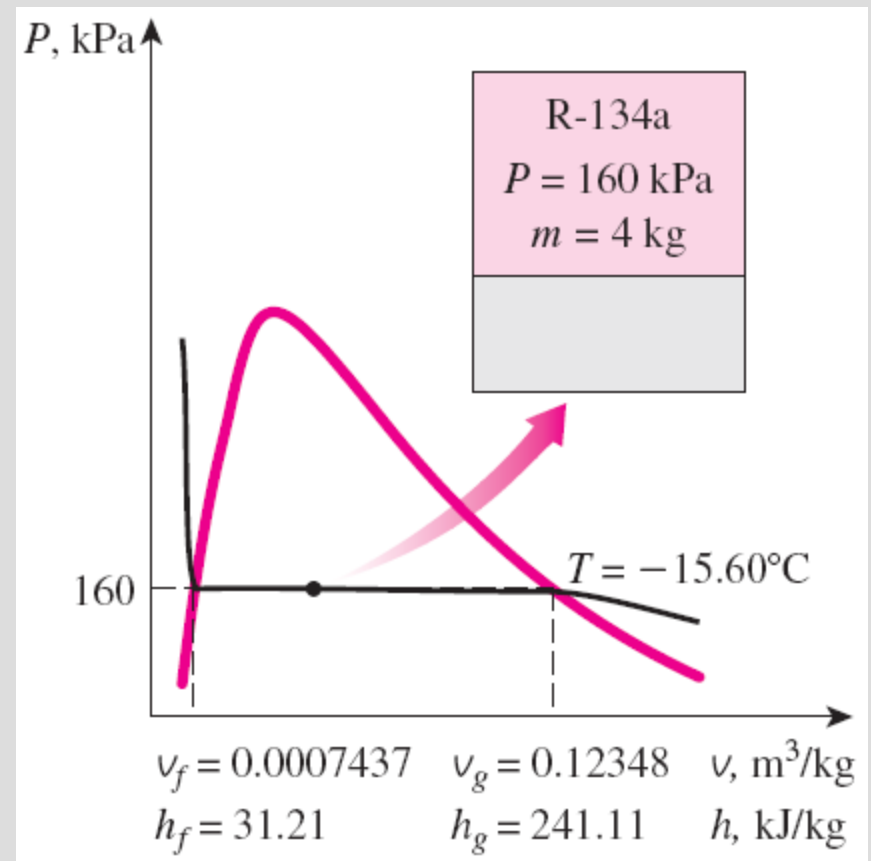
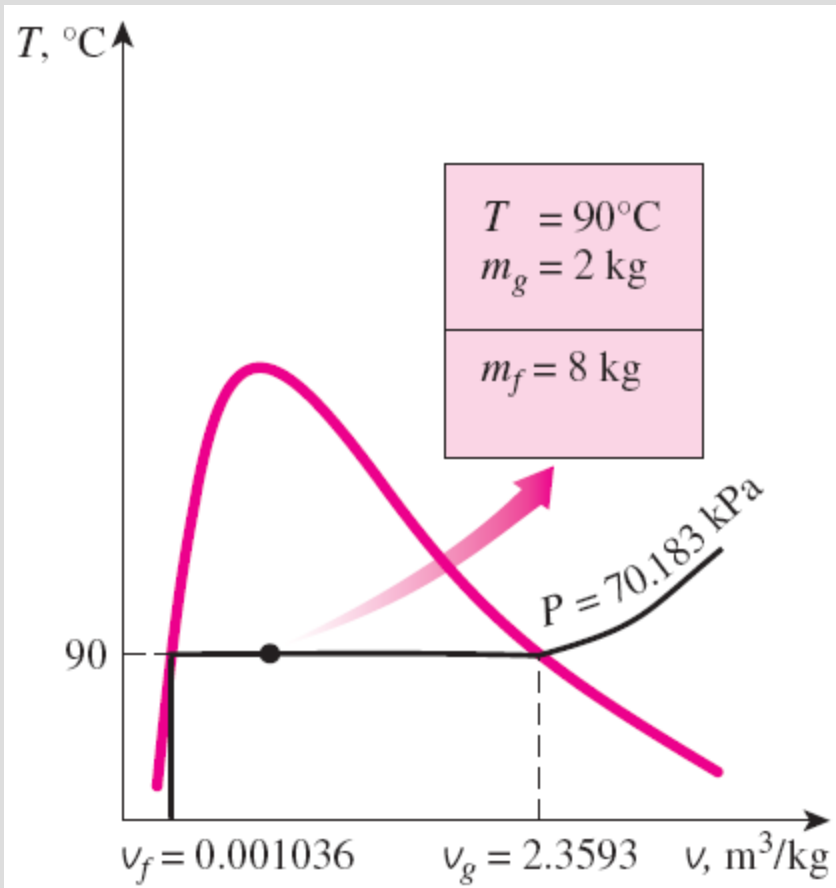


Kuruluk derecesi
P- v ve T- v
diyagramlarında
yatay uzunluklarla
orantılıdır.



Belirli bir T veya P noktası için doymuş
sıvı-buhar karışımının v değeri v_f ve v_g
değerleri arasında bulunur.

Examples: Doymuş sıvı-buhar karışımları genel çizimler ve T - v ve P - v diyagramları.



Doymuş buhar eğrisinin sağındaki bölgede ve kritik noktasal sıcaklığın üzerindeki sıcaklıkta madde kızgın buhardır.

Kızgın buhar bölgesi tek fazlı (sadece buhar fazı) bir bölge olduğundan, sıcaklık ve basınç artık birbirlerine bağlı değildir.

	v	u	h
$T, ^\circ\text{C}$	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg
$P = 0.1 \text{ MPa} (99.61^\circ\text{C})$			
Sat.	1.6941	2505.6	2675.0
100	1.6959	2506.2	2675.8
150	1.9367	2582.9	2776.6
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
1300	7.2605	4687.2	5413.3
$P = 0.5 \text{ MPa} (151.83^\circ\text{C})$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1
200	0.42503	2643.3	2855.8
250	0.47443	2723.8	2961.0

Kızgın Buhar

Kızgın buhar ile doymuş buharın karşılaştırılması

Lower pressures ($P < P_{\text{sat}}$ at a given T)

Higher temperatures ($T > T_{\text{sat}}$ at a given P)

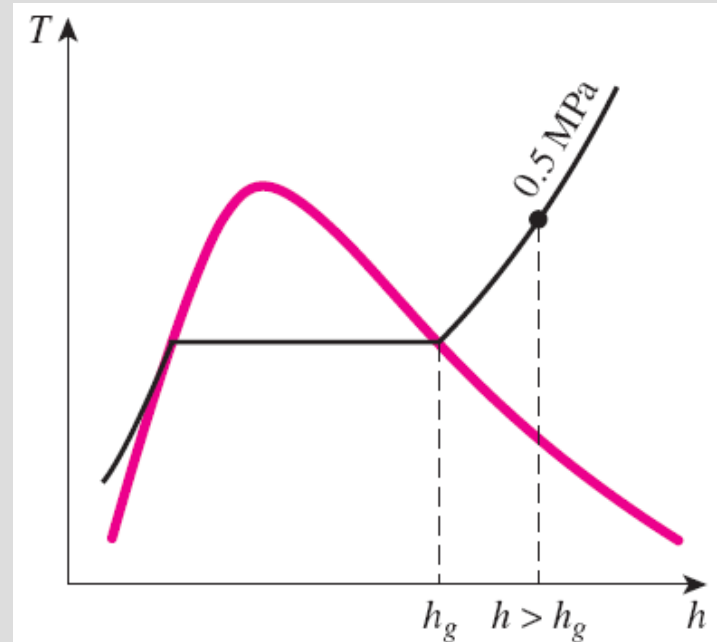
Higher specific volumes ($v > v_g$ at a given P or T)

Higher internal energies ($u > u_g$ at a given P or T)

Higher enthalpies ($h > h_g$ at a given P or T)

Belirli bir P noktası için kızgın buharın entalpisi, doymuş buharından daha yüksektir.

Tablo A-6'nın bir bölümü.



Sıkıştırılmış sıvıya ilişkin bilgilerin yokluğunda, sıkıştırılmış sıvı özelliklerini doymuş sıvı özelliklerine eşit almak, genellikle benimsenen bir uygulamadır.

$$y \cong y_f @ T \quad y \rightarrow v, u, \text{ or } h$$

Hassas olarak “**h**” ilişkisini hesaplamak için

$$h \cong h_f @ T + v_f @ T (P - P_{\text{sat}} @ T)$$

Given: P and T

$$v \cong v_f @ T$$

$$u \cong u_f @ T$$

$$h \cong h_f @ T$$

Verilen bir sıcaklıkta sıkıştırılmış sıvının özellikleri doymuş sıvı özelliklerine yaklaşık olarak eşit alınabilir.

Verilen bir basınç ve sıcaklıkta, saf bir madde, $T < T_{\text{sat}}$ @ P olduğu zaman sıkıştırılmış sıvı olacaktır.

Sıkıştırılmış Sıvı

Compressed liquid is characterized by

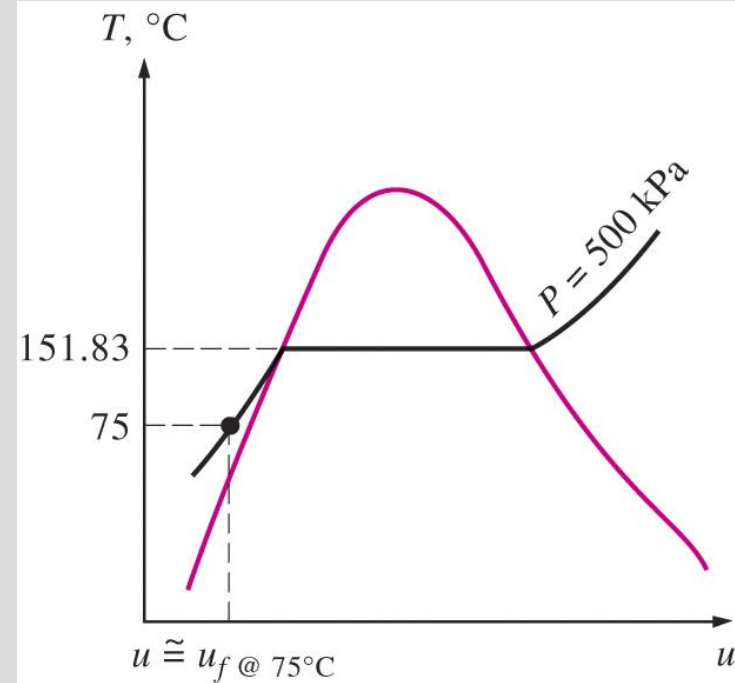
Higher pressures ($P > P_{\text{sat}}$ at a given T)

Lower temperatures ($T < T_{\text{sat}}$ at a given P)

Lower specific volumes ($v < v_f$ at a given P or T)

Lower internal energies ($u < u_f$ at a given P or T)

Lower enthalpies ($h < h_f$ at a given P or T)



Referans Hali ve Referans Değerleri

- u , h ve s 'nin değerleri doğrudan ölçülemez ve bu nedenle bunlar, termodinamik bağıntılar kullanılarak ölçülebilen özelliklerden hesaplanır.
- Söz konusu termodinamik bağıntılar özelliklerin bir haldeki değerlerini değil, özelliklerin değişimlerini verir.
- Bu nedenle, uygun bir **referans** halinin seçilmesi ve uygun özellik veya özelliklere bu noktada **sifir** değerinin atanması gerekir.
- Su için referans hali $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ve soğutucu akışkan-134a için referans hali $-40\text{ }^\circ\text{C}$.
- Bazı özelliklerin seçilen referans halinden dolayı eksi değerler alacağı not edilmelidir.
- Tabloların hazırlanması sırasında bazen aynı madde ve hal için değişik tablolarda farklı değerler bulmanın olasıdır.
- Fakat termodinamik hesaplarında özelliklerin mutlak değerlerinden çok, özelliklerde olan **değişimler önem taşır**.

Saturated water—Temperature table

Temp., $T\text{ }^\circ\text{C}$	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249

Saturated refrigerant-134a—Temperature table

Temp., $T\text{ }^\circ\text{C}$	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
-40	51.25	0.0007054	0.36081	-0.036	207.40	207.37	0.000	225.86	225.86	0.00000	0.96866	0.96866

MÜKEMMEL GAZ HAL DENKLEMİ

- **Hal denklemi:** Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasındaki ilişkiyi veren herhangi bir bağıntıya denir.
- Bu denklemlerin en basit ve en çok bilineni mükemmel gaz hal denklemdir. Bu denklem belirli sınırlar içinde gazların P - v - T ilişkisini oldukça hassas bir biçimde verir.

$$P = R \left(\frac{T}{v} \right) \quad PV = RT \quad \text{Mükemmel gaz hal denklemi}$$

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

R : gaz sabiti

M : mol kütlesi (kg/kmol)

R_u : üniversal gaz sabiti

$$R_u = \begin{cases} 8.31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 8.31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 0.0831447 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 1.98588 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} \\ 10.7316 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R} \\ 1545.37 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot \text{R} \end{cases}$$

Substance	R , kJ/kg·K
Air	0.2870
Helium	2.0769
Argon	0.2081
Nitrogen	0.2968

Değişik maddelerin farklı gaz sabitleri vardır.

Mass = Molar mass \times Mole number

$$m = MN \quad (\text{kg})$$

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

mükemmel gazın iki değişik haldeki özellikleri arasında bir bağ kurabiliriz

$$V = m v \longrightarrow P V = m R T$$

$$m R = (MN) R = N R_u \longrightarrow P V = N R_u T$$

$$V = N \bar{v} \longrightarrow P \bar{v} = R_u T$$

Mükemmel gaz hal denklemini birkaç değişik biçimde yazılabilir.

Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu azalır ve mükemmel gaz gibi davranır.

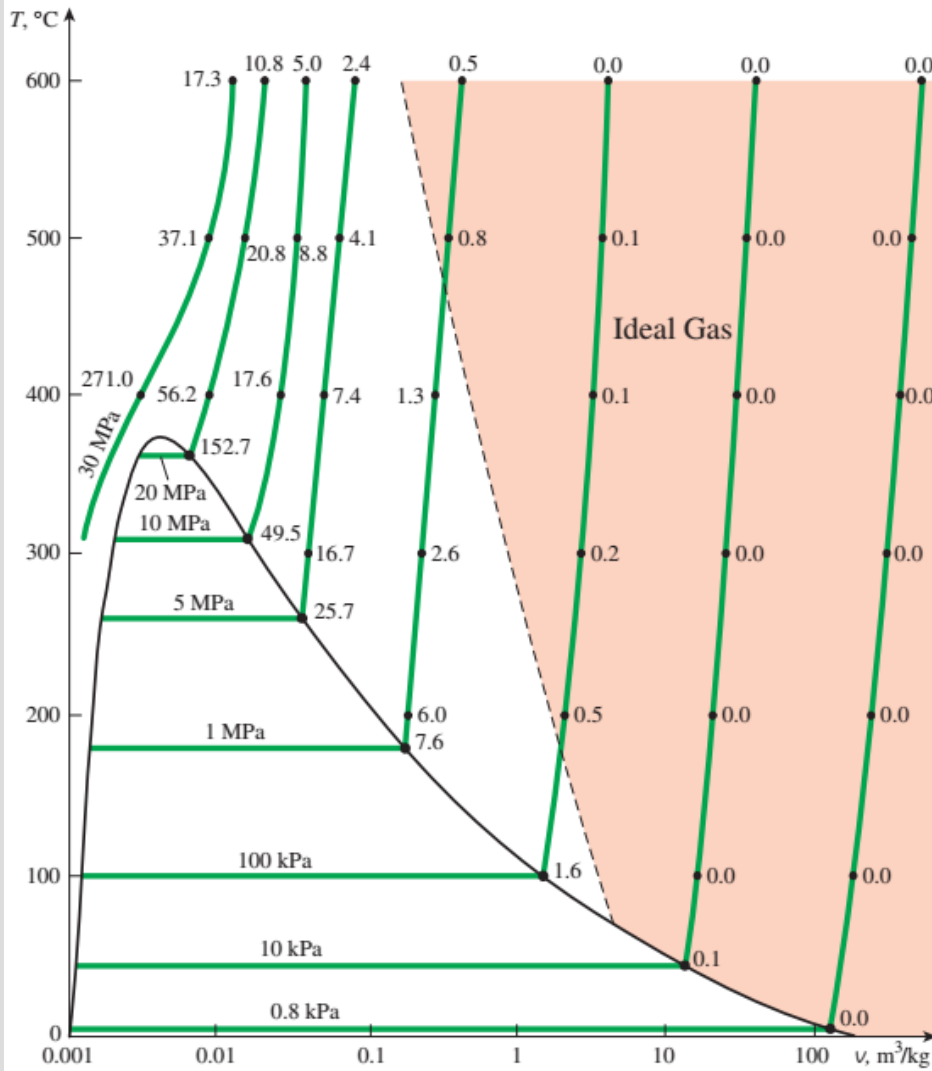


Mükemmel gaz bağıntısı çoğu zaman gerçek gazlar için uygulanabilir değildir, bu nedenle bağıntının kullanılacağı durum iyi etüt edilmelidir.

Per unit mass	Per unit mole
$v, \text{m}^3/\text{kg}$	$\bar{v}, \text{m}^3/\text{kmol}$
$u, \text{kJ}/\text{kg}$	$\bar{u}, \text{kJ}/\text{kmol}$
$h, \text{kJ}/\text{kg}$	$\bar{h}, \text{kJ}/\text{kmol}$

Birim mol için verilen özellikler üstte bir çizgi belirtilir.

Su Buharı Mükemmel bir Gaz mıdır ?



- 10 kPa basıncın altındaki basınçlar için su buharı sıcaklık ne olursa olsun (yüzde 0.1'den daha az bir hatayla) mükemmel gaz kabul edilebilir.
- Fakat daha yüksek basınçlarda mükemmel gaz varsayımı özellikle kritik nokta ve doymuş buhar eğrisi yakınlarında kabul edilemeyecek hatalara yol açar.
- Isıtma – havalandırma – iklimlendirme uygulamalarında, havadaki su buharının kısmi basıncı çok düşük olduğundan, su buharı neredeyse sıfır hatayla mükemmel gaz sayılabilir.
- Fakat buharlı güç santrallerinde uygulama basınçları çok yüksektir, bu nedenle mükemmel gaz bağıntıları kullanılmamalıdır.

Su buharının mükemmel gaz olarak kabul edilmesinden kaynaklanan hata yüzdesi ($[|v_{table} - v_{ideal}|/v_{table}] \times 100$) ve su buharının %1'den az hatayla mükemmel gaz olarak davranabileceği bölge.

SIKIŞTIRILABİLME ÇARPANI - MÜKEMMEL GAZ DAVRANIŞINDAN SAPMANIN ÖLÇÜSÜ

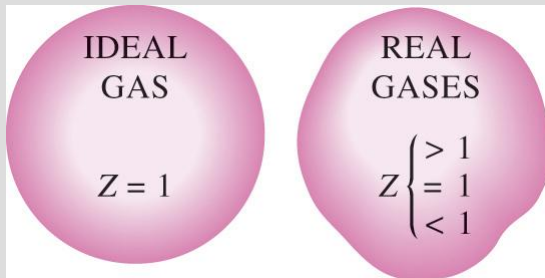
Sıkıştırılabilme çarpanı Z

Verilen bir sıcaklık ve basınçta mükemmel gaz davranışından sapma sıkıştırılabilme çarpanı Z adı verilen bir parametre kullanılarak giderilebilir.

$$PV = ZRT$$

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

$$Z = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{ideal}}}$$

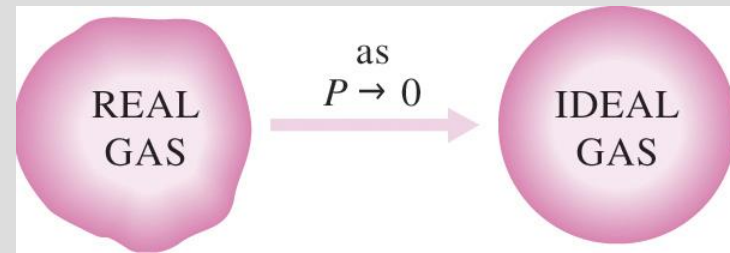


Sıkıştırılabilirlik çarpanı mükemmel gazlar birdir

1 değerinden ne kadar uzaklaşırsa mükemmel gaz davranışından sapma da o kadar büyük olur. düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda gazların mükemmel gaz gibi davranırlar.

Soru: Düşük basınç ve yüksek sıcaklıkla belirtilmek istenen sınırlar nedir?

Cevap: bir maddenin sıcaklığına veya basıncına yüksek veya düşük diyebilmek için kritik sıcaklığını ve basıncını göz önüne almak gerekir.



Çok düşük basınçlarda, tüm gazlar mükemmel gaz davranışına yaklaşırlar (sıcaklığa bağılı olmaksızın).

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}}$$

indirgenmiş
basınç

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}}$$

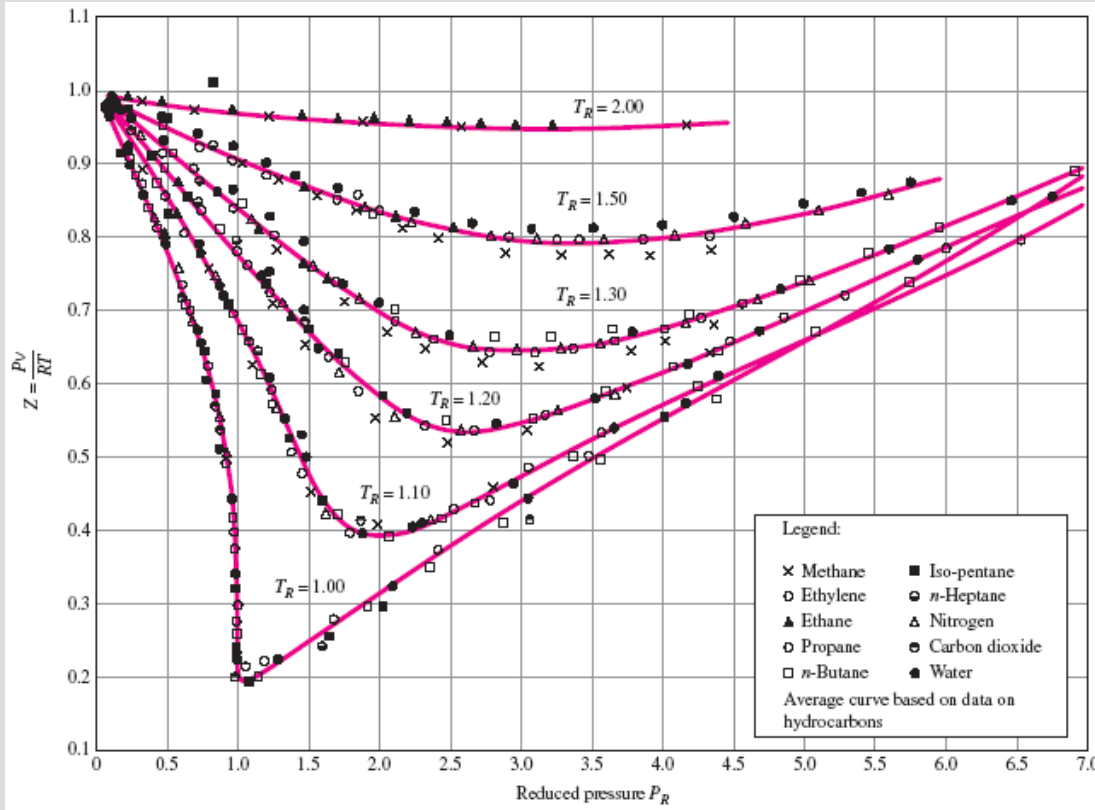
indirgenmiş
sıcaklık

$$V_R = \frac{V_{actual}}{RT_{cr}/P_{cr}}$$

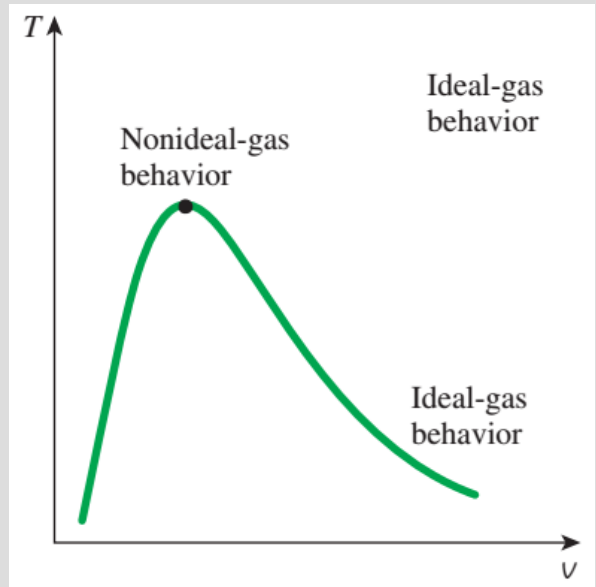
İndirgenmiş
özellik hacim

$$\left. \begin{aligned} P_R &= \frac{P}{P_{cr}} \\ V_R &= \frac{V}{RT_{cr}/P_{cr}} \end{aligned} \right\} Z = \dots \quad (\text{Fig. A-15})$$

Sıkıştırılabilirlik çarpanı (Z) P_R ve V_R değerlerindende elde edilebilir.



Değişik gazlar için Z çarpanlarının karşılaştırılması.



Kritik nokta yakınlarında gazlar mükemmel gaz davranışından uzaklaşırlar.

DİĞER HAL DENKLEMLERİ

Maddelerin P - v - T ilişkilerini daha geniş sınırlar içinde herhangi bir kısıtlama olmadan ifade eden hal denklemlerine gerek duyulur.

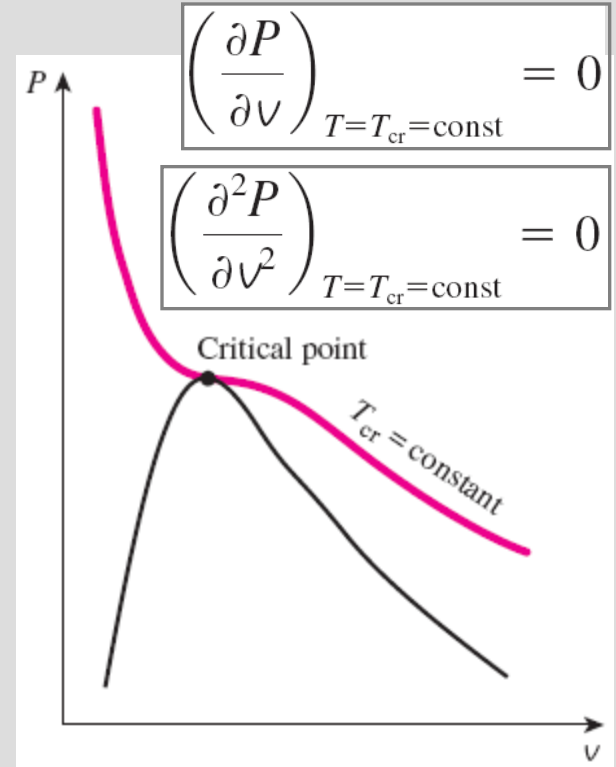
Van der Waals Hal Denklemi

$$\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \quad b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}}$$

Van der Waals, mükemmel gaz hal denkleminde göz önüne alınmayan iki etkiyi hesaba katarak, mükemmel gaz hal denklemini iyileştirmeyi amaçlamıştı. Bunlar **molekülleri birbirine çeken kuvvetler** ve **moleküllerin kapladığı hacimdi**.

Saf maddenin kritik noktadan geçen sabit sıcaklık eğrisinin birinci ve ikinci türevleri sıfırdır.



Beattie-Bridgeman Hal Denklemi

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

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

sabitlerin değişik maddeler için değerleri Tablo 3-4 de verilmiştir. Beattie-Bridgeman denklemi $0.8\rho_{cr}$ 'ye kadar olan yoğunluklar için oldukça hassas sonuçlar verir.

Benedict-Webb-Rubin Equation of State

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

sabitlerin değerleri Tablo 3-4'de verilmiştir. Bu denklem yoğunluğu $2.5 \rho_{cr}$ 'ye kadar olan maddelere uygulanabilir.

Virial Equation of State

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{a(T)}{v^2} + \frac{b(T)}{v^3} + \frac{c(T)}{v^4} + \frac{d(T)}{v^5} + \dots$$

sıcaklığın fonksiyonu olan $a(T)$, $b(T)$, $c(T)$, ve benzeri katsayılar da *etki katsayıları* diye adlandırılır.

TABLE 3-4

Constants that appear in the Beattie-Bridgeman and the Benedict-Webb-Rubin equations of state

(a) When P is in kPa, \bar{v} is in m^3/kmol , T is in K, and $R_u = 8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$, the five constants in the Beattie-Bridgeman equation are as follows:

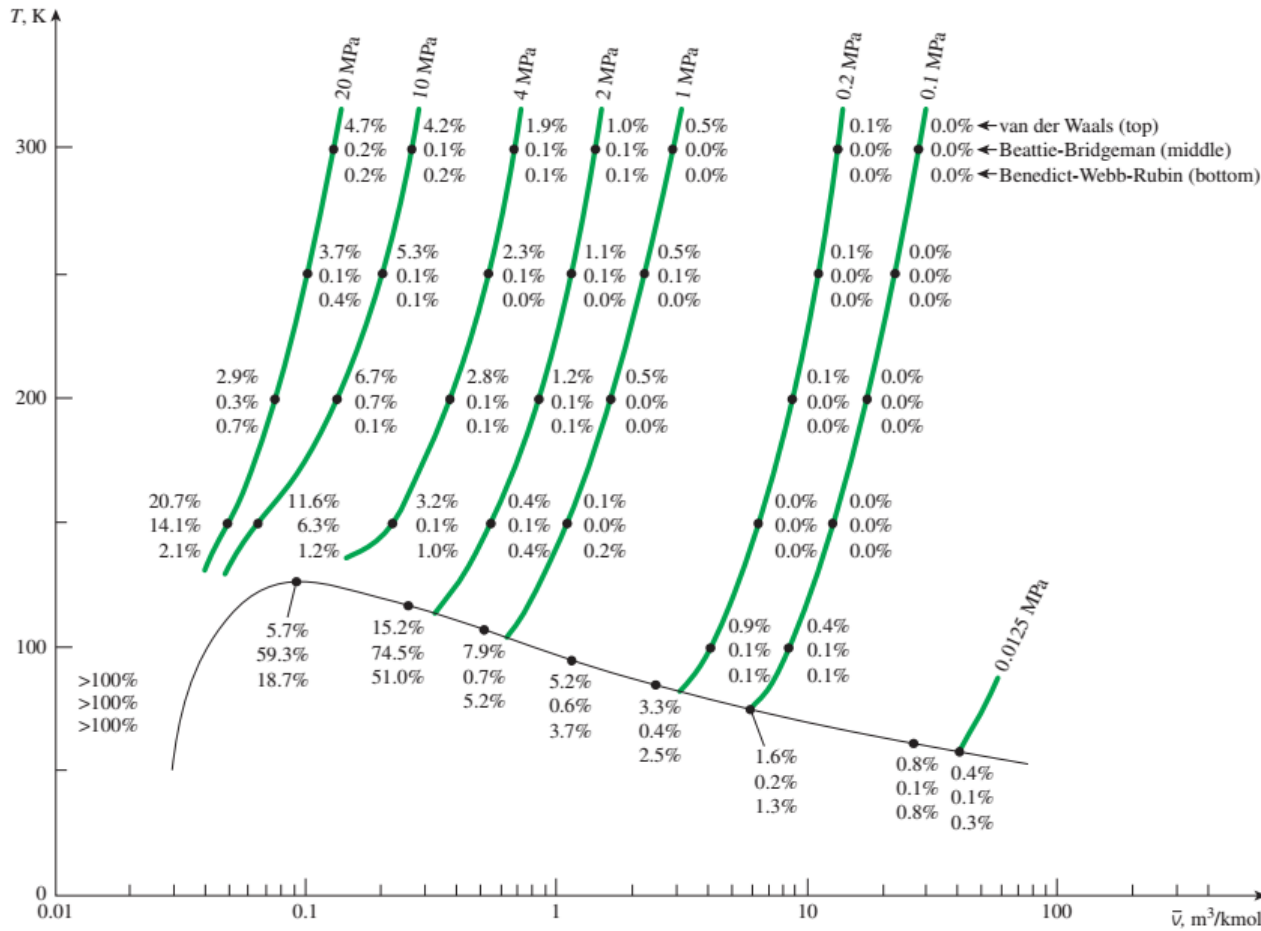
Gas	A_0	a	B_0	b	c
Air	131.8441	0.01931	0.04611	-0.001101	4.34×10^4
Argon, Ar	130.7802	0.02328	0.03931	0.0	5.99×10^4
Carbon dioxide, CO_2	507.2836	0.07132	0.10476	0.07235	6.60×10^5
Helium, He	2.1886	0.05984	0.01400	0.0	40
Hydrogen, H_2	20.0117	-0.00506	0.02096	-0.04359	504
Nitrogen, N_2	136.2315	0.02617	0.05046	-0.00691	4.20×10^4
Oxygen, O_2	151.0857	0.02562	0.04624	0.004208	4.80×10^4

Source: Gordon J. Van Wylene and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1986), p. 46, table 3.3.

(b) When P is in kPa, \bar{v} is in m^3/kmol , T is in K, and $R_u = 8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$, the eight constants in the Benedict-Webb-Rubin equation are as follows:

Gas	a	A_0	b	B_0	c	C_0	α	γ
n-Butane, C_4H_{10}	190.68	1021.6	0.039998	0.12436	3.205×10^7	1.006×10^8	1.101×10^{-3}	0.0340
Carbon dioxide, CO_2	13.86	277.30	0.007210	0.04991	1.511×10^6	1.404×10^7	8.470×10^{-5}	0.00539
Carbon monoxide, CO	3.71	135.87	0.002632	0.05454	1.054×10^5	8.673×10^5	1.350×10^{-4}	0.0060
Methane, CH_4	5.00	187.91	0.003380	0.04260	2.578×10^5	2.286×10^6	1.244×10^{-4}	0.0060
Nitrogen, N_2	2.54	106.73	0.002328	0.04074	7.379×10^4	8.164×10^5	1.272×10^{-4}	0.0053

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), p. 815, table A-21M. Originally published in H. W. Cooper and J. C. Goldfrank, *Hydrocarbon Processing* 46, no. 12 (1967), p. 141.



Değişik hal denklemlerinin azot için verdikleri sonuçlardaki yüzde hata ($\% \text{ error} = [(|v_{\text{table}} - v_{\text{equation}}|)/v_{\text{table}}] \times 100$).

Karmaşık hal denklemleri gazların P-v-T davranışlarını geniş bir aralıkta hassas bir biçimde belirler.

Summary

- Pure substance
- Phases of a pure substance
- Phase-change processes of pure substances
 - ✓ Compressed liquid, Saturated liquid, Saturated vapor, Superheated vapor
 - ✓ Saturation temperature and Saturation pressure
- Property diagrams for phase change processes
 - ✓ The T - v diagram, The P - v diagram, The P - T diagram, The P - v - T surface
- Property tables
 - ✓ Enthalpy
 - ✓ Saturated liquid, saturated vapor, Saturated liquid vapor mixture, Superheated vapor, compressed liquid
 - ✓ Reference state and reference values
- The ideal gas equation of state
 - ✓ Is water vapor an ideal gas?
- Compressibility factor
- Other equations of state
 - ✓ van der Waals Equation of State, Beattie-Bridgeman Equation of State
 - ✓ Benedict-Webb-Rubin Equation of State, Virial Equation of State