

Bölüm 3

SAF MADDENİN ÖZELLİKLERİ

Amaçlar

- 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 sıkıştırılabilirlik 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 karışımdır, kimyasal bileşiminin her noktada aynı ve değişmez olmasından dolayı saf maddedir.



Azot ve gaz halindeki hava saf maddelerdir



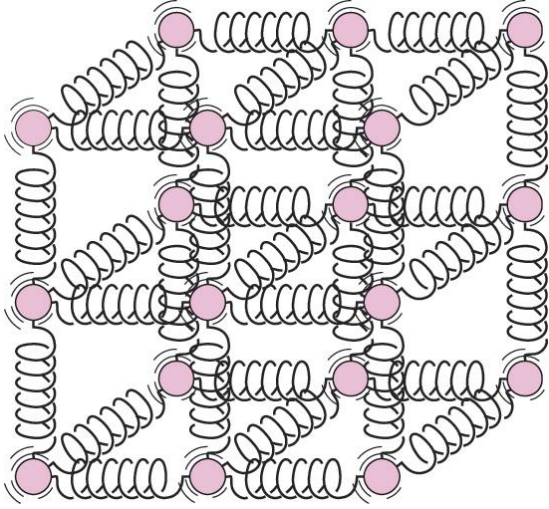
(a) H₂O



b) HAVA

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

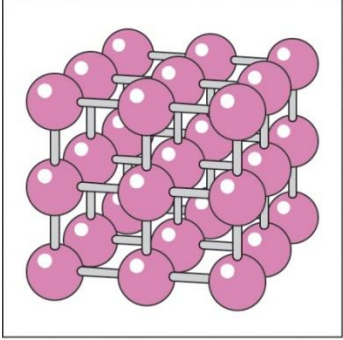
SAF MADDENİN FAZLARI



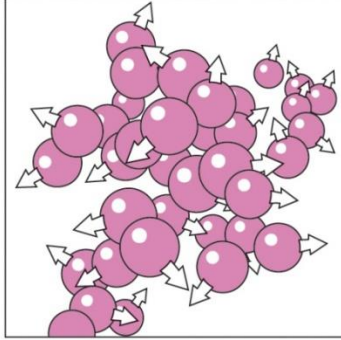
Katı bir cismi oluşturan moleküller, yay benzeri moleküller arası kuvvetlerle yerlerinde tutulurlar



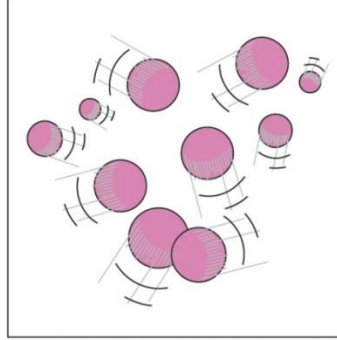
Bir katıda, moleküller arasındaki itici ve çekici güçler, molekülleri nispeten birbirinden aynı uzaklıklarda tutma eğilimindedirler .



(a)



(b)



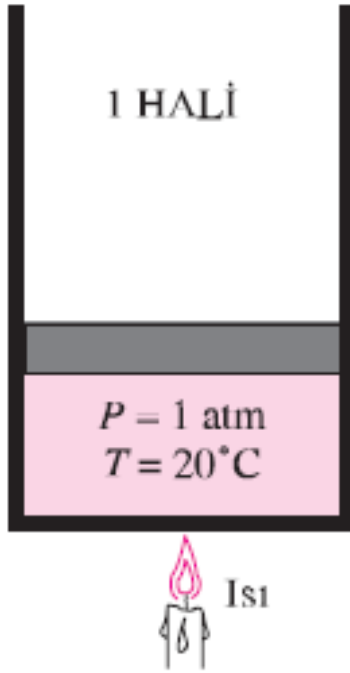
(c)

Atomların farklı fazlardaki düzenleri:

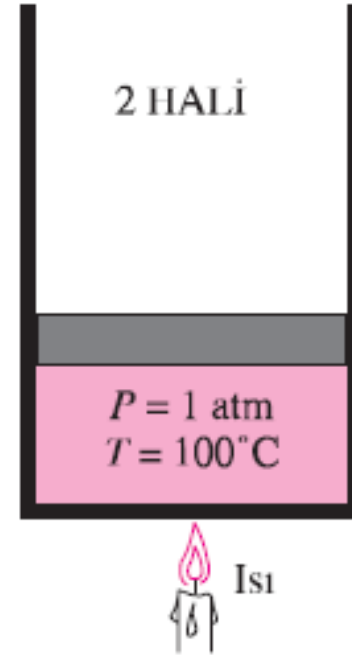
- (a) bir katıdaki moleküller nispeten sabittir,
- (b) sıvı fazda molekül grupları birbirleri etrafında hareket ederler ve
- (c) gaz fazında moleküller rastgele hareket ederler.

SAF MADDELERİN FAZ DEĞİŞİM İŞLEMLERİ

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

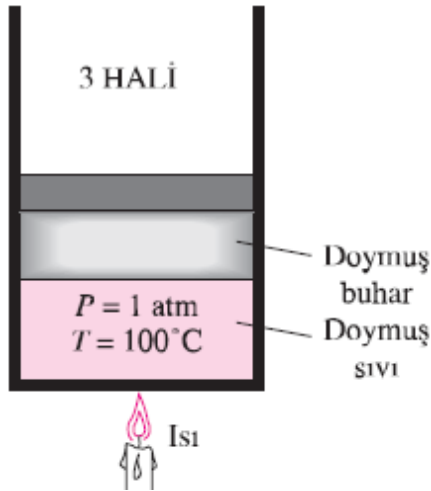


1 atm basınçta ve 20°C sıcaklıkta su sıvı fazındadır (*sıkıştırılmış sıvı*)

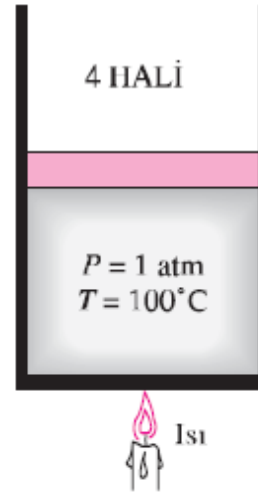


1 atm basınçta ve 100°C sıcaklıkta su buharlaşma başlangıcındadır (*Doymuş sıvı*)

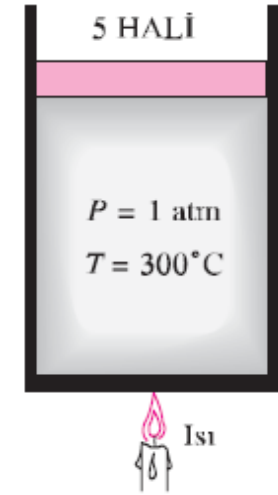
3. **Doymuş buhar:** Yoğuşmanın sınırında olan buhara.
4. **Doymuş sıvı-buhar karışımı:** Bu durumda sıvı ve buhar fazları bir arada ve dengede bulunur.
5. **Kızgın buhar:** Yoğuşma sınırında olmayan (yani doymuş buhar gibi değil) buhara denir.



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



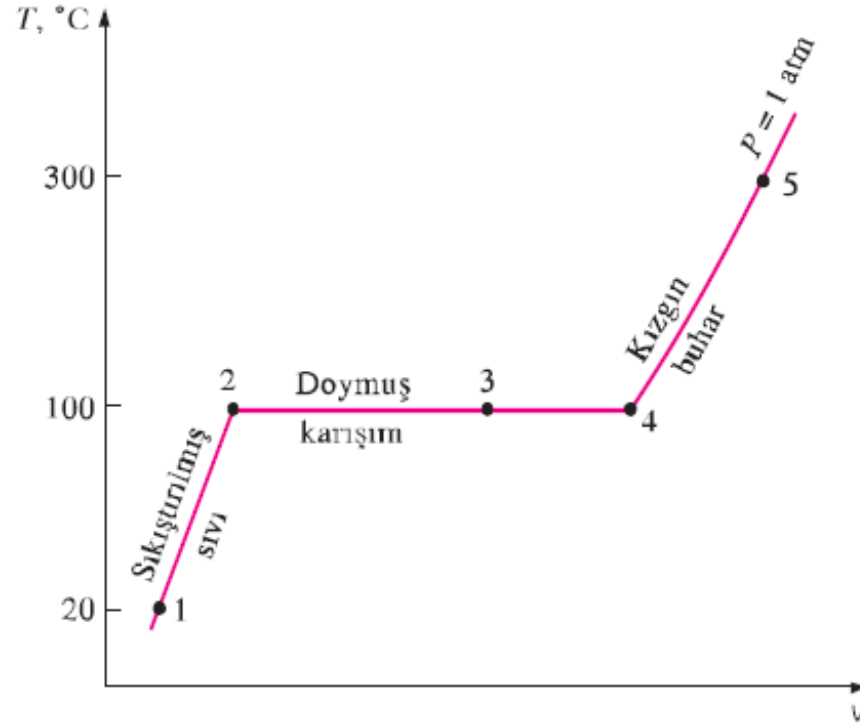
1 atm basınçta sıvının son damlası da buharlaşıncaya kadar sıcaklık 100°C 'de sabit kalır. (*doymuş buhar*)



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

Hal değişiminin tamamı; suyu sabit basınçta soğutularak tersine çevrilirse, su benzer bir yol izleyerek, başka bir deyişle aynı hallerden geçerek, yeniden 1 haline dönecektir.

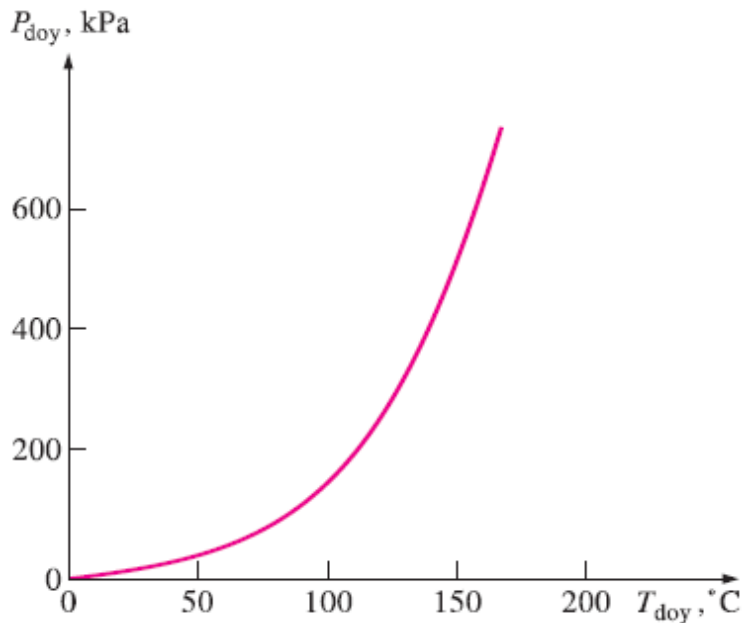
Bu hal değişimi sırasında açığa çıkan ısınn miktarı, ısıtma işlemi sırasında eklenen ısınn miktarına tamamen eşit olacaktır.



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).

TABLO 3-1

Farklı sıcaklıklarda suyun donma (kaynama) basıncı

Sıcaklık, T , °C	Doyma basıncı, 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

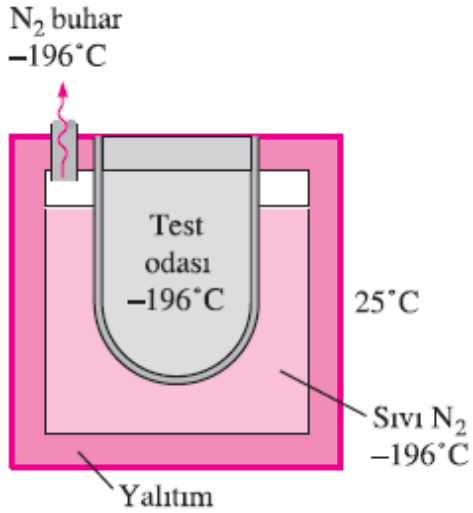
- **Gizli ısı:** Faz değişimi süreci boyunca alınan veya verilen enerjinin miktarı.
- **Gizli füzyon ısı:** erime süresince emilen enerjinin miktarına denir ve donma süresince ortama verilen enerjiye eşittir.
- **Gizli buharlaşma ısı:** Buharlaşma süresince çekilen enerjiye gizli buharlaşma ısı denir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

TABLO 3-2

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

Yükseklik, m	Atmosfer basıncı, kPa	Kaynama sıcaklığı °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

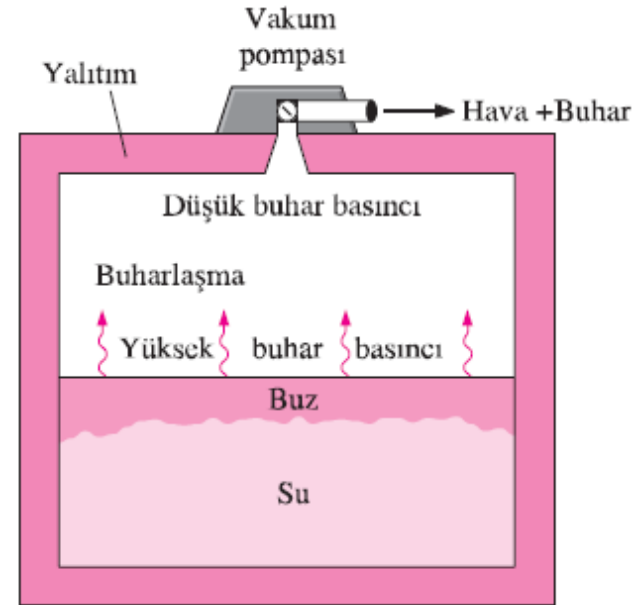
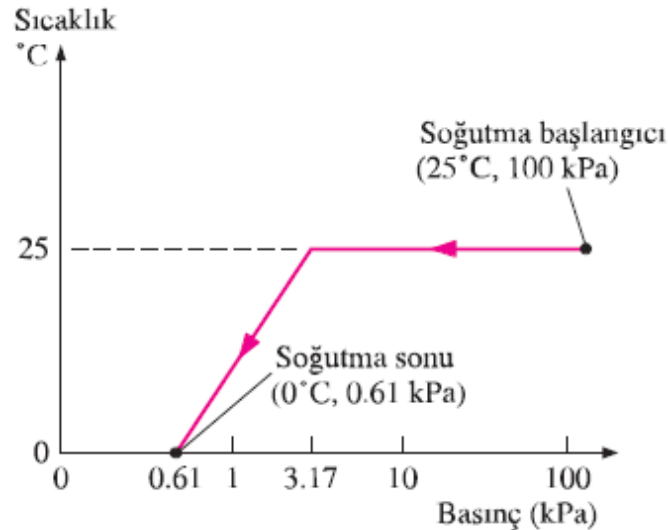
T_{doyma} ve P_{doyma} Bağımlılığının Bazı Sonuçları



25 °C'den 0 °C'ye vakumlu soğutma süresince sebze ve meyvelerin basınçla sıcaklık değişimleri

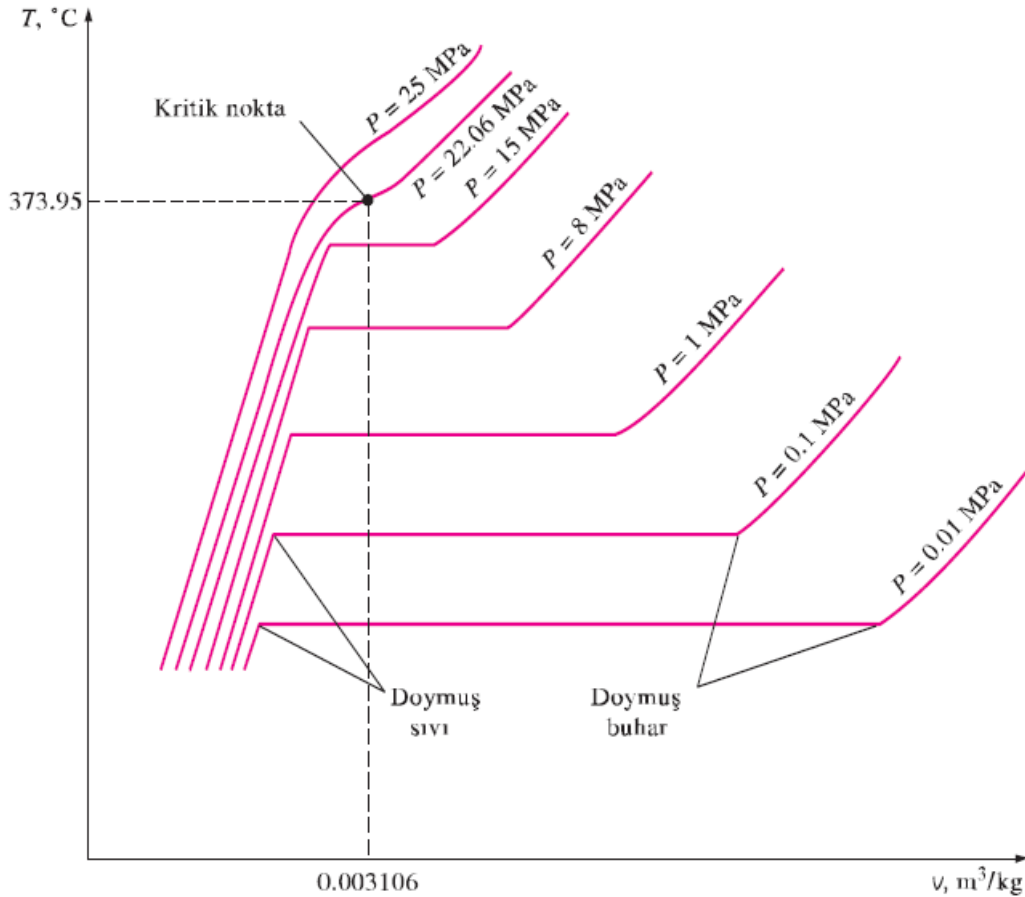
1775 yılında Sun tankındaki hava boşluğu boşaltılarak buz elde edildi.

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



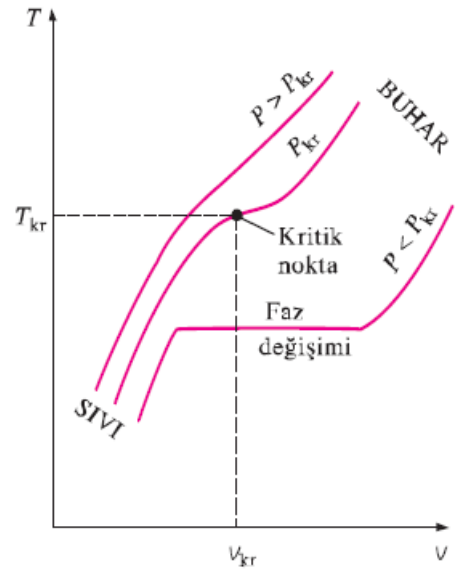
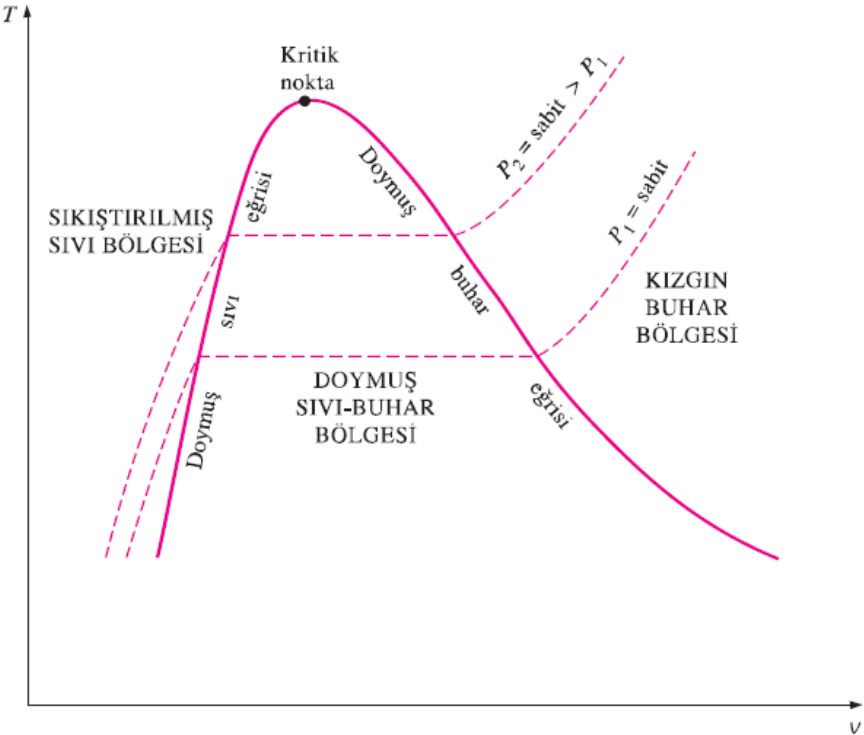
FAZ DEĞİŞİMİ İŞLEMLERİ İÇİN ÖZELİK DİYAGRAMALARI

- 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*).

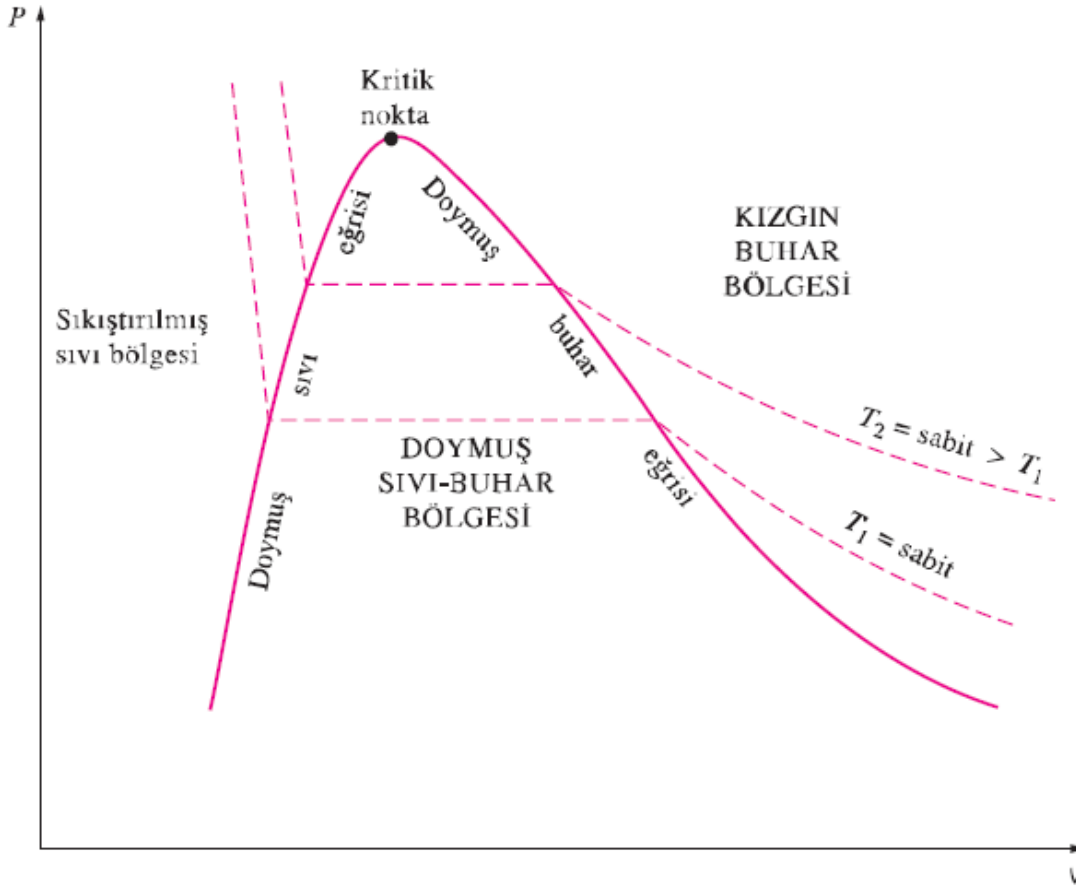
- Doymuş sıvı çizgisi
- Doymuş buhar çizgisi
- Sıkıştırılmış sıvı çizgisi
- Kızgın buhar bölgesi
- Sıkıştırılmış sıvı-buhar karşım bölgesi (ıslak buhar)



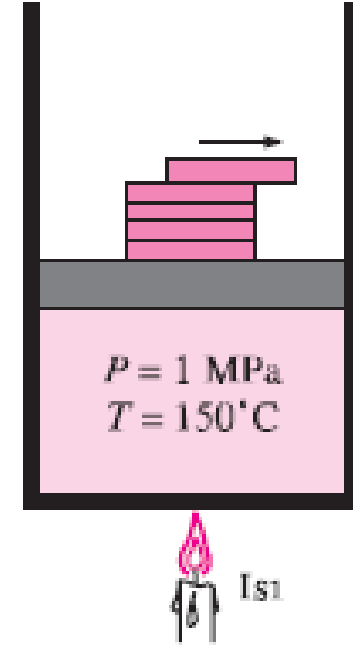
Kritik noktanın üzerindeki basınçlarda ($P > P_{cr}$), farklı bir faz değişim (kaynama) süreci yoktur.

Saf bir maddenin T-v diyagramı

Kritik nokta: Doymuş Sıvıyla, doymuş buhar hallerinin aynı olduğu hal.



Saf bir maddenin P - v diyagramı

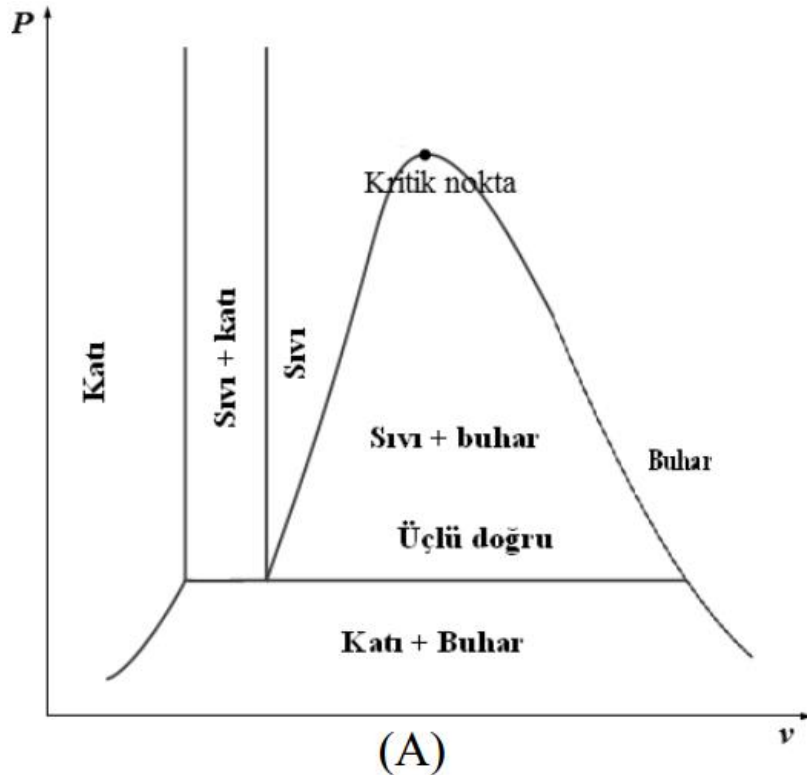
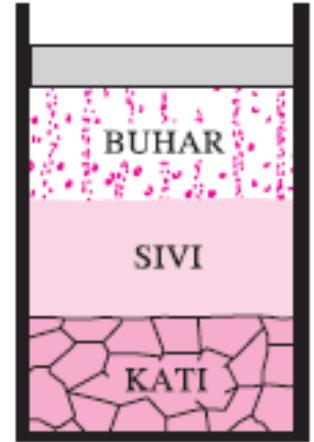


Bir piston silindir düzeneğindeki basınç, pistonun ağırlığı azaltılarak düşürülebilir.

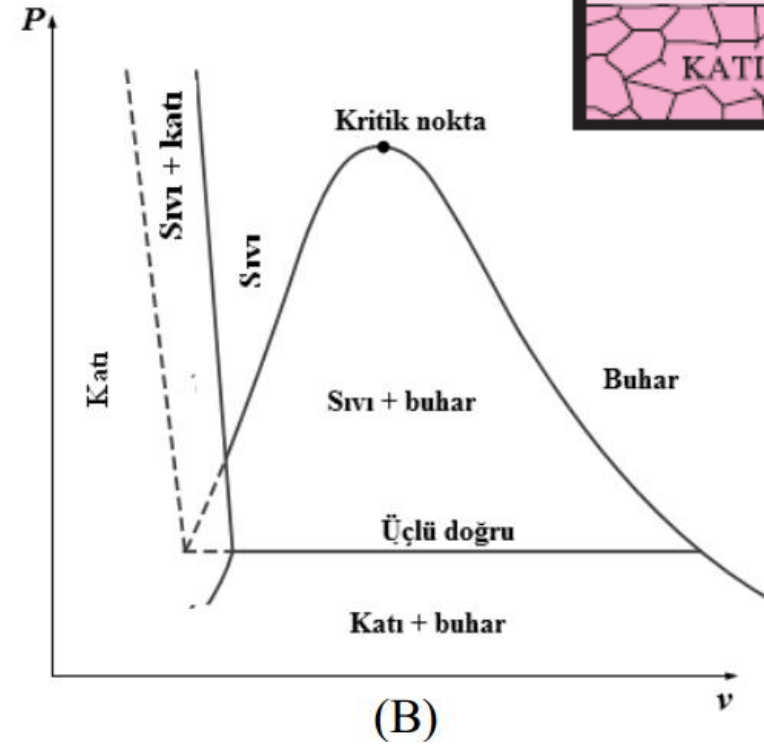
Diyagramların Katı Fazıyla Beraber Genişletilmesi

Bir madde üçlü nokta basınç ve sıcaklığında bulunur.

Su için,
 $T_{tp} = 0,01^{\circ}\text{C}$
 $P_{tp} = 0,6117 \text{ kPa}$

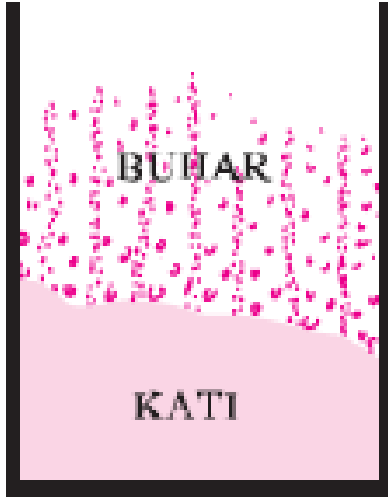


Donarken hacmi küçülen bir madenin P-v diyagramı



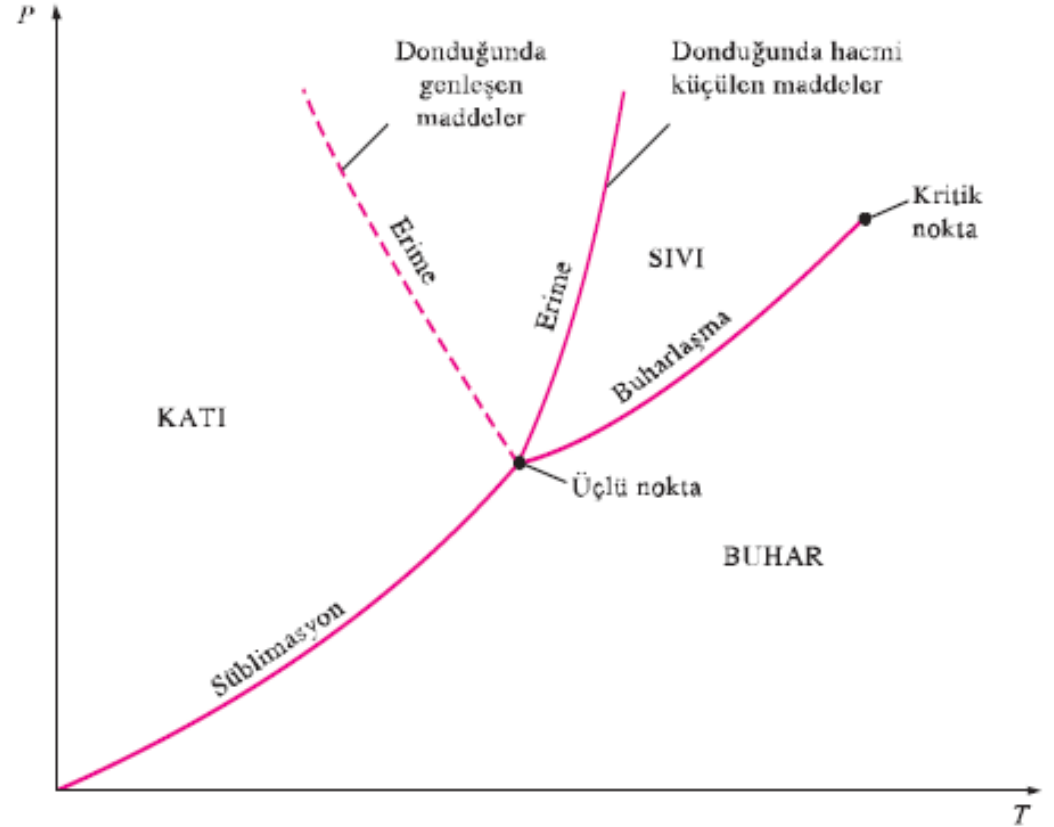
Donarken genişleyen (su gibi) bir maddenin P-v diyagramı

Süblimasyon: Katı fazından doğrudan buhar fazına geçiş



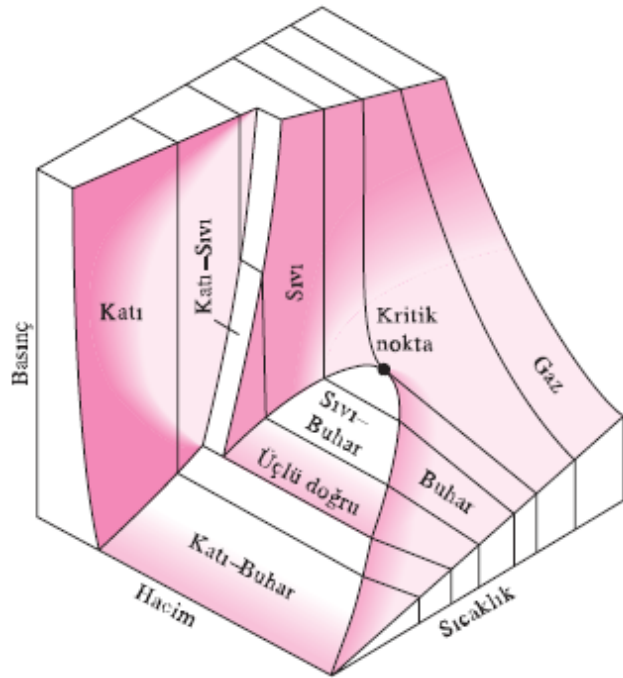
Düşük basınçlarda (*üçlü nokta basıncının altında*) katılar sıvı fazından geçmeden buharlaşır (*süblimasyon*)

Faz Diyagramı (P-T)

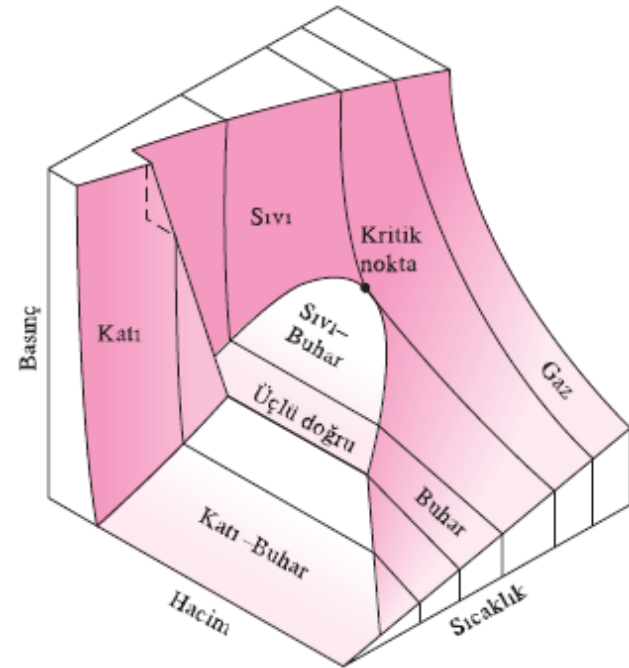


Saf maddelerin *P-T* diyagramı

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

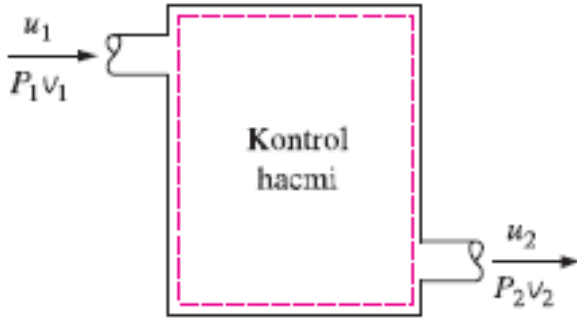
ÖZELİK TABLOLARI

- 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 kullanılabilecek tablolara sunulur.

Entalpi- Bir Karma Özellik

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

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



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

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

*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.

v_f = doymuş sıvının özgül hacmi

v_g = doymuş buharın özgül hacmi

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

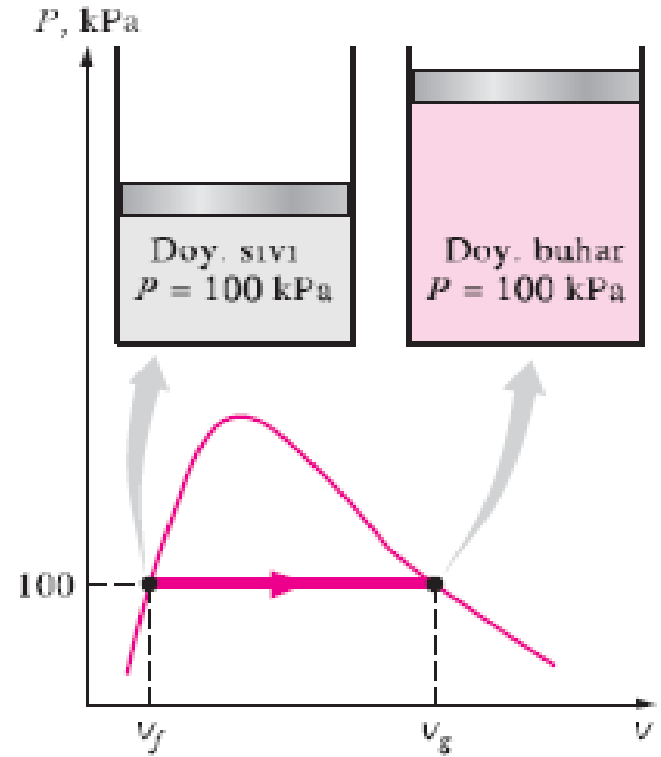
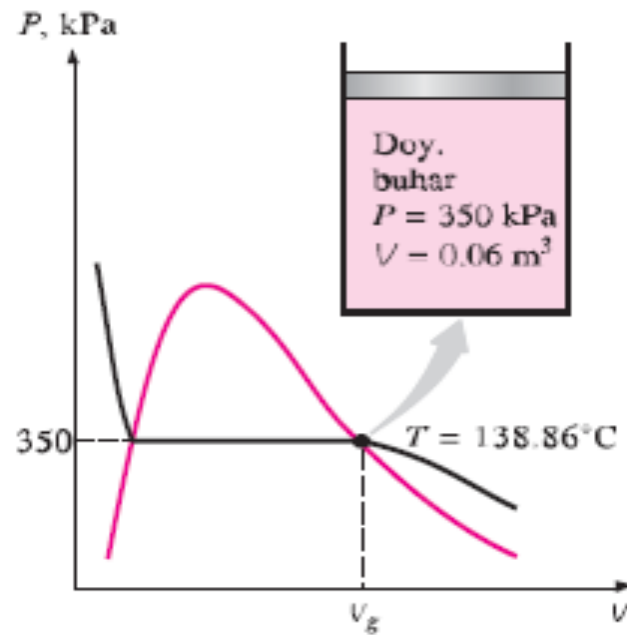
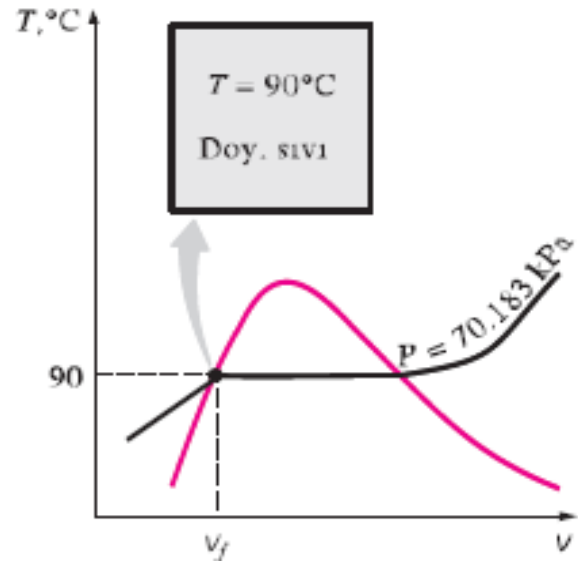
Buharlaştırma entalpisi, h_{fg} (Buharlaştırma gizli ısı): verilen bir basınç veya sıcaklıkta doymuş sıvının birim kütlesini buharlaştırmak için gereken enerjidir.

TABLO A–4

Doymuş su — Sıcaklık tablosu

		Özgül hacim, m³/kg		İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg		Entropi, kJ/(kg.K)			
Sıcaklık., T °C	Doymuş basıncı., P_{doym} kPa	Doymuş sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, 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
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633

Örnekler: Genel çizimler ve T - v ve P - v diyagramları

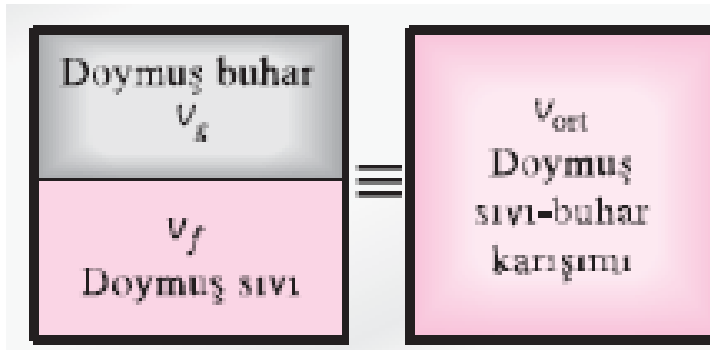


Doymuş Sıvı-Buhar Karışımı

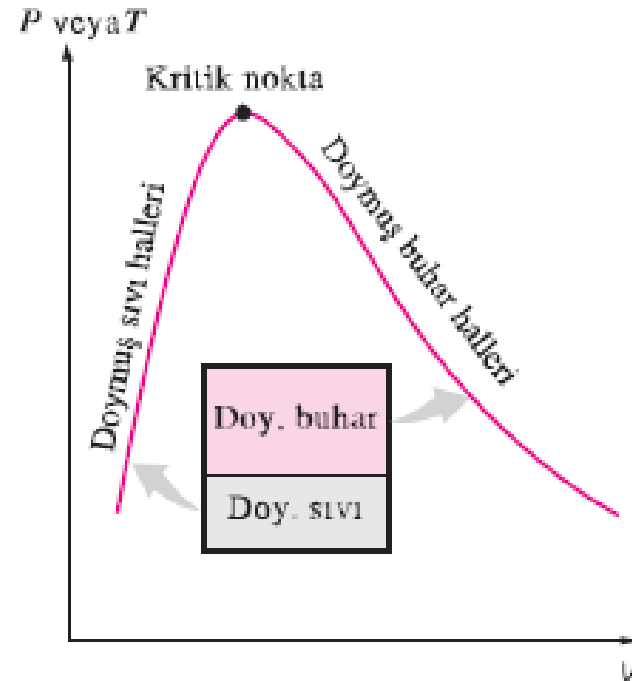
Kuruluk derecesi, x : karışımdaki sıvı ve buhar fazlarının oranı.

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.



İki fazlı bir sistem uygunluk için homojen bir karışım gibi davranabilir



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

Kuruluk derecesi:

$$x = \frac{m_g}{m}; \quad m_g = x.m \quad m = m_f + m_g$$

Toplam hacim=Doymuş sıvı hacmi + Doymuş buhar hacmi

$$V = V_f + V_g$$

$$V = m.v \Rightarrow m.v = m_f.v_f + m_g.v_g$$

$$m_f = m - m_g$$

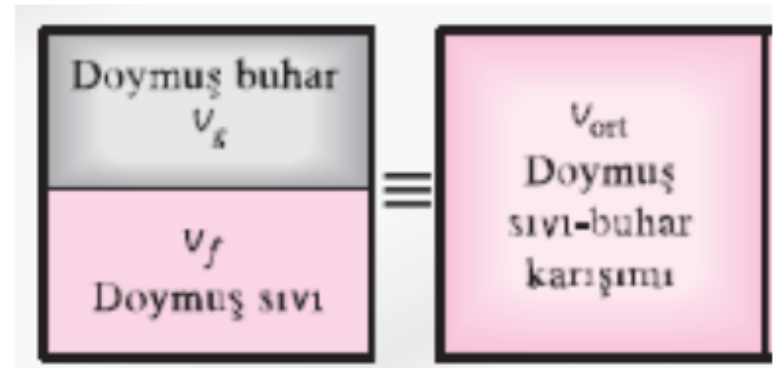
$$m.v = (m - m_g).v_f + m_g.v_g$$

$$m.v = m.v_f - m_g.v_f + m_g.v_g$$

$$m.v = m.v_f + m_g(v_g - v_f)$$

$$\frac{m.v}{m} = \frac{m}{m}.v_f + \frac{m_g}{m}(v_g - v_f)$$

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$

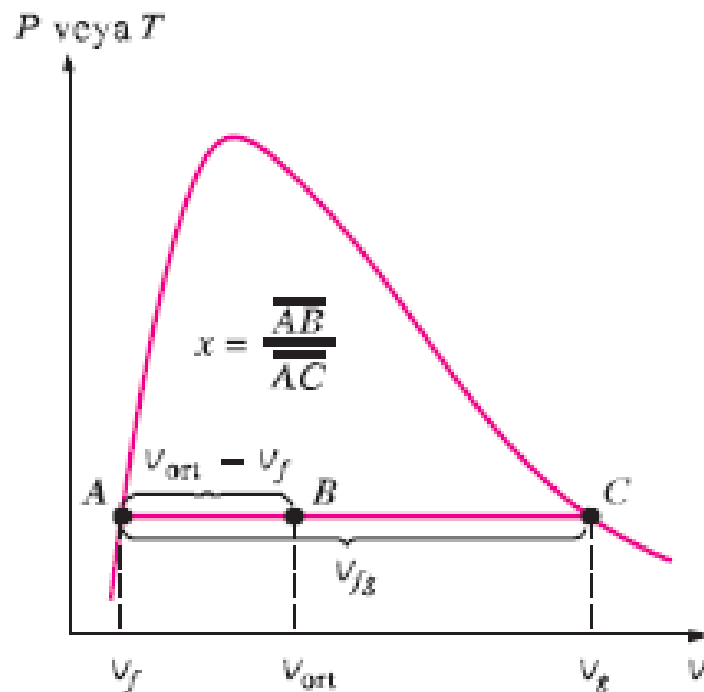


$$v = v_f + x(v_g - v_f) \quad (m^3 / kg)$$

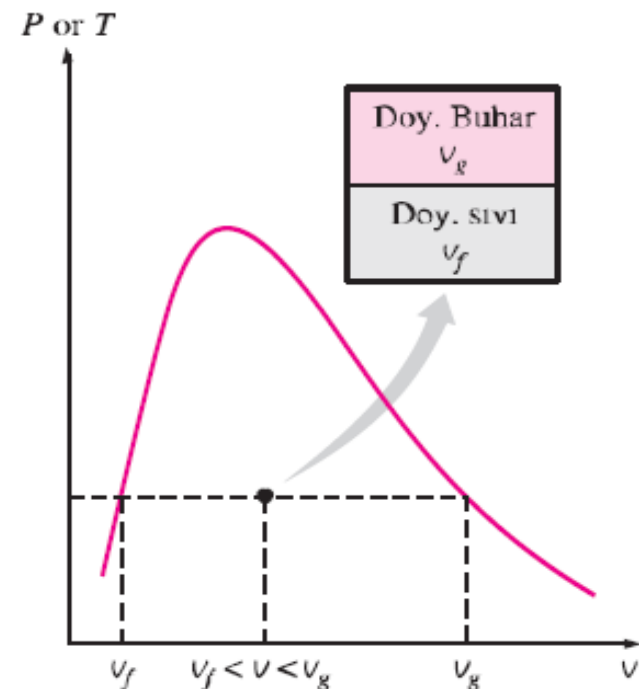
$$u = u_f + x(u_g - u_f) \quad (kJ / kg)$$

$$h = h_f + x(h_g - h_f) \quad (kJ / kg)$$

$$s = s_f + x(s_g - s_f) \quad (kJ / kg.K)$$

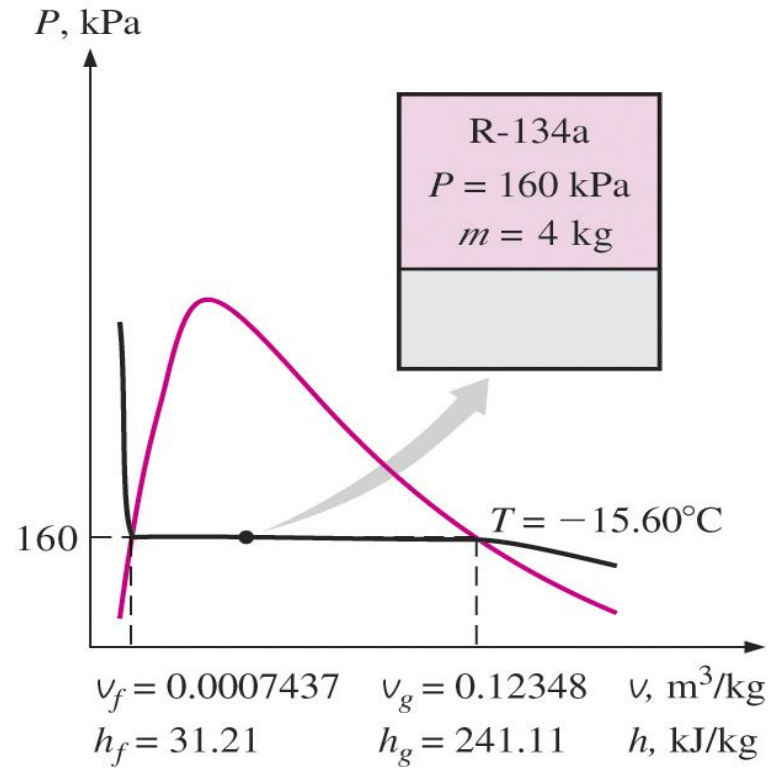
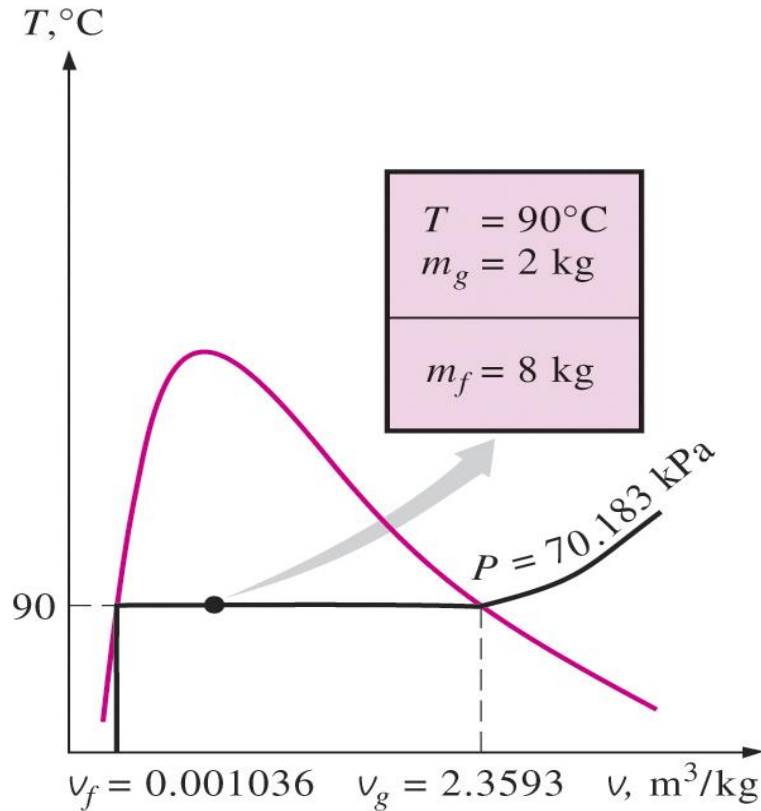


Kuruluk derecesi P- v ve T- v diyagramlarında yatay uzunluklarla orantılıdır.



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

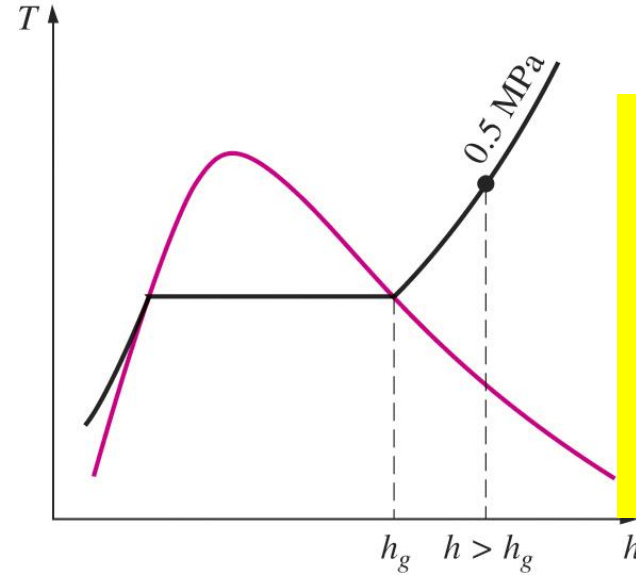
Örnekler: Doymuş sıvı-buhar karışımları genel çizimler ve T - v ve P - v diyagramları.



Kızgın Buhar

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.



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

$T, ^\circ\text{C}$	v m^3/kg	u kJ/kg	h 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

Tablo A-6'nın bir bölümü

Kızgın buhar ile doymuş buharın karşılaştırılması

Düşük basınçlar (verilen bir sıcaklık T 'de $P < P_{\text{doyma}}$)

Yüksek sıcaklıklar (verilen bir basınç P 'de $T > T_{\text{doyma}}$)

Yüksek özgül hacimler (verilen bir sıcaklık T 'veya basınç P 'de $v > v_g$)

Yüksek iç enerjiler (verilen bir sıcaklık T 'veya basınç P 'de $u > u_g$)

Yüksek entalpiler (verilen bir sıcaklık T 'veya basınç P 'de $h > h_g$)

Sıkıştırılmış Sıvı

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;

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

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 bölgesinde özellikler

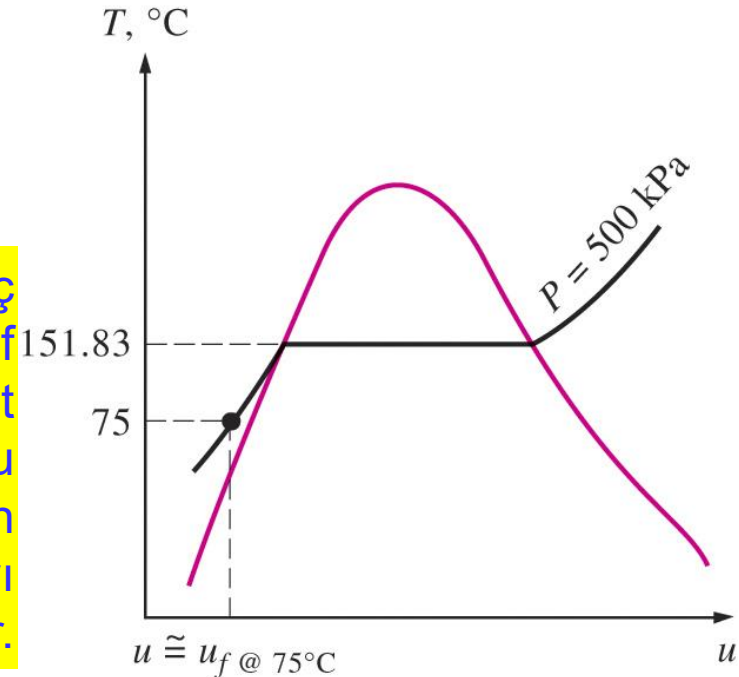
Yüksek basınçlar (verilen bir sıcaklık T 'de $P > P_{\text{doyma}}$)

Düşük sıcaklıklar (verilen bir basınç P 'de $T < T_{\text{doyma}}$)

Düşük özgül hacimler (verilen bir sıcaklık T veya basınç P 'de $v < v_f$)

Düşük iç enerjiler (verilen bir sıcaklık T veya basınç P 'de $u < u_f$)

Düşük entalpiler (verilen bir sıcaklık T veya basınç P 'de $h < h_f$)



Verilen: P ve T

$$v \cong v_f @ T$$

$$u \cong u_f @ T$$

$$h \cong h_f @ T$$

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 sıfır 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.*

Enterplasyon ile ara deęer bulma

$$\frac{P_2 - P_1}{P_{son} - P_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_{son} - T_1} = \frac{v_2 - v_1}{v_{son} - v_1} = \frac{u_2 - u_1}{u_{son} - u_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_{son} - h_1} = \frac{s_2 - s_1}{s_{son} - s_1}$$

TABLO A-5

Doymuş su - Basınç tablosu

		Özgöl hacim, m ³ /kg			İç enerji, kJ/kg		Entalpi, kJ/kg			Entropi, kJ/(kg.K)		
Basınç., P kPa	Doyma sıcaklığı., T _{doy} °C	Doymuş sıvı, v _f	Doymuş buhar, v _g	Doymuş sıvı, u _f	Buhar., u _{fg}	Doymuş buhar, u _g	Doymuş sıvı, h _f	Buhar., h _{fg}	Doymuş buhar, h _g	Doymuş sıvı, s _f	Buhar., s _{fg}	Doymuş buhar, s _g
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886

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 denklemidir. Bu denklem belirli sınırlar içinde gazların P - v - T ilişkisini oldukça hassas bir biçimde verir.

Mükemmel gaz hal denklemi

$$P = R \left(\frac{T}{v} \right)$$

$$Pv = RT$$

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

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

R : gaz sabiti (kJ/kgK)

M : mol kütlesi (kg/kmol)

R_u : universal gaz sabiti (kJ/kmol K)

Madde	R , kJ/kg·K
Hava	0.2870
Helyum	2.0769
Argon	0.2081
Azot	0.2968

Değişik maddelerin farklı gaz sabitleri vardır.

Kütle = Mol kütlesi × Mol sayısı

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

Mükemmel gaz hal denklemi birkaç değişik biçimde yazılabilir

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

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

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

Birim kütle için	Birim mol için
$v, \text{ m}^3/\text{kg}$	$\bar{v}, \text{ m}^3/\text{kmol}$
$u, \text{ kJ/kg}$	$\bar{u}, \text{ kJ/kmol}$
$h, \text{ kJ/kg}$	$\bar{h}, \text{ kJ/kmol}$

Birim mol için verilen özellikler üstte bir çizgi belirtilir.

mükemmel gazın iki değişik haldeki özellikleri arasında bir bağ kurabiliriz

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

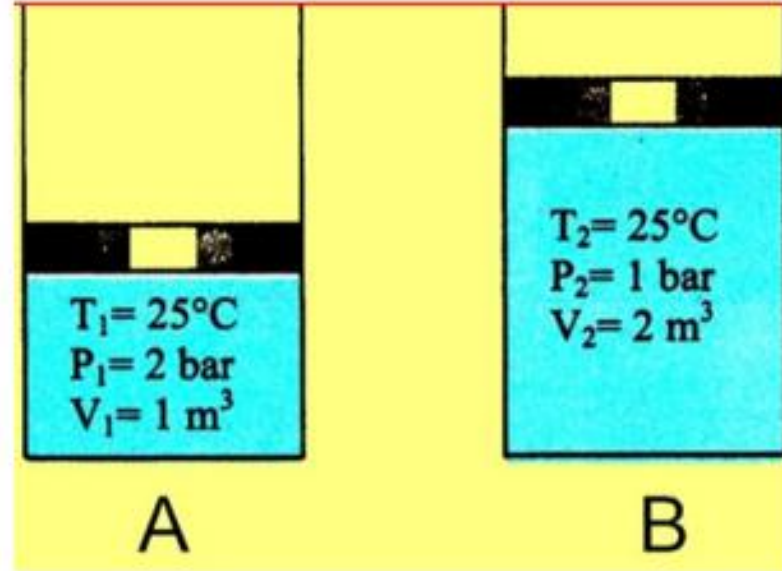
Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu azalır ve mükemmel gaz gibi davranır.

$$P \cdot v = R \cdot T \rightarrow P \cdot \frac{1}{\rho} = R \cdot T$$
$$\rightarrow \rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

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

Boyle-Mariotte Kanunu

Kütlesi sabit ve sabit sıcaklıkta ısıtılan bir gazın basınç ve hacimlerinin çarpımı sabittir. $P \cdot V = \text{sabit}$ ($T = \text{sabit}$ için) eşitliği Boyle-Mariotte Kanunu'nun matematiksel ifadesidir.



Sıkıştırılan gazın hacmi küçülürken basıncı artıyor. B'de ise hacim büyürken basıncı azalır.

A konumundaki gaz için $P_1 \cdot V_1 = m \cdot R \cdot T_1$

B konumundaki gaz için $P_2 \cdot V_2 = m \cdot R \cdot T_2$

$T_1 = T_2$ sabit olduğundan 1-2 arasında Boyle-Mariotte Kanunu şu bağıntı ile hesaplanır;

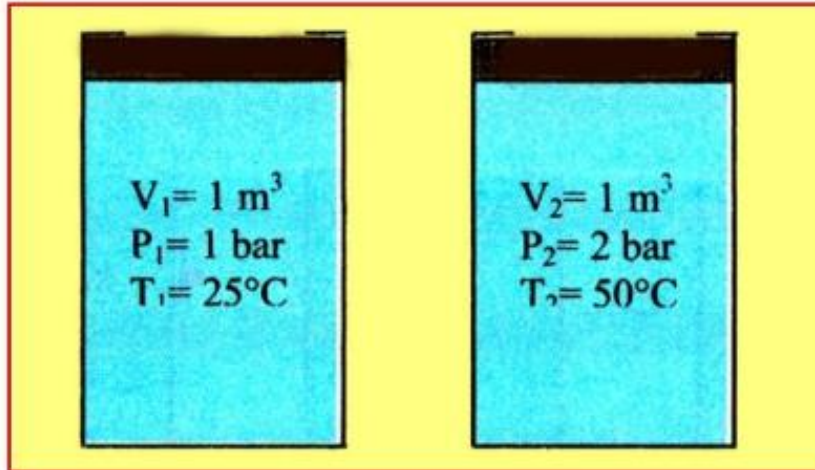
$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Gay-Lussac Sabit Hacim Kanunu

Kütlesi sabit ve sabit hacimde tutulan bir gazın mutlak basıncının, mutlak sıcaklığa oranı daima sabit kalır.

Gay-Lussac Sabit Hacim Kanunu şu bağıntı ile ifade edilir:

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

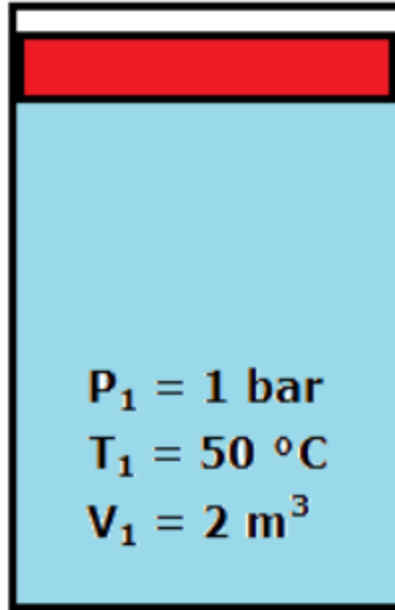
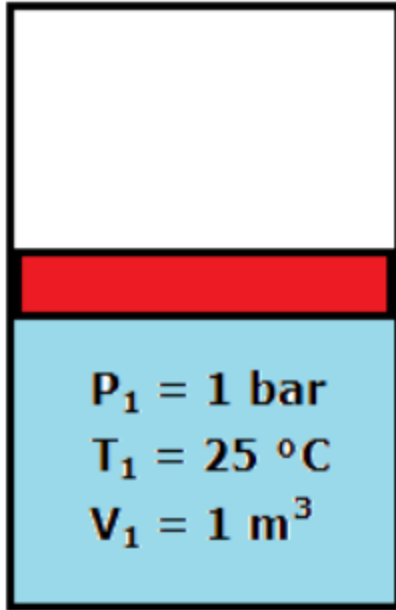


Gay-Lussac Sabit Basınç Kanunu

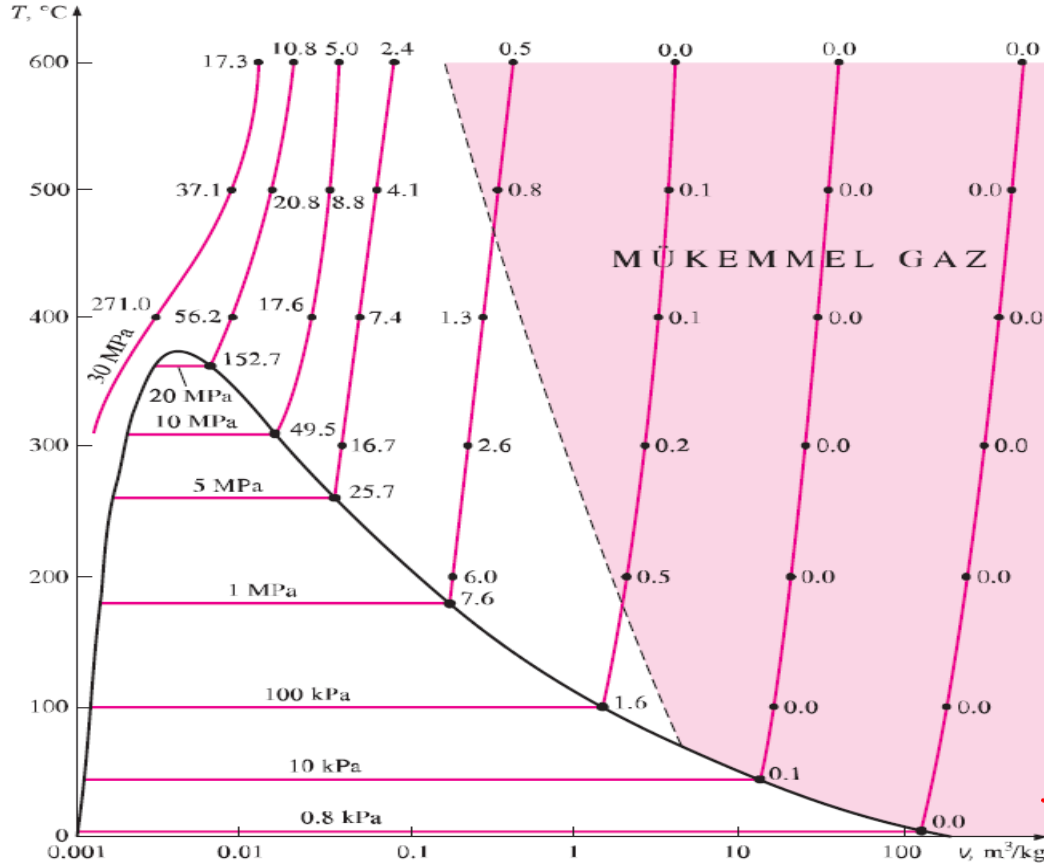
Kütlesi sabit ve sabit basınçta tutulan bir gazın mutlak hacminin, mutlak sıcaklığa oranı daima sabit kalır.

Gay-Lussac Sabit Basınç Kanunu şu bağıntı ile ifade edilir:

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



Su Buharı Mükemmel bir Gaz mıdır ?



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

- 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 yakınılarında 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.

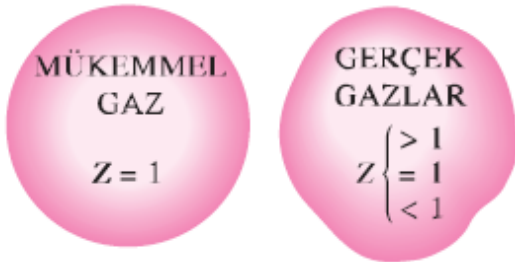
SIKIŞTIRILABİLME ÇARPANI - Mükemmel Gaz Davranışından Sapmanın Ölçüsü

Sıkıştırılabilirlik çarpanı Z

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

$$PV = ZRT$$

$$Z = \frac{PV}{RT} \quad Z = \frac{V_{\text{gerçek}}}{V_{\text{mükemmel}}}$$



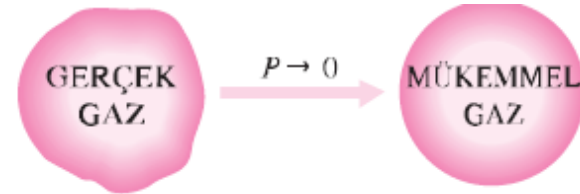
Sıkıştırılabilirlik çarpanı mükemmel gazlar birdir

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 bağlı olmaksızın)

İndirgenmiş basınç, Sıcaklık ve Hacim

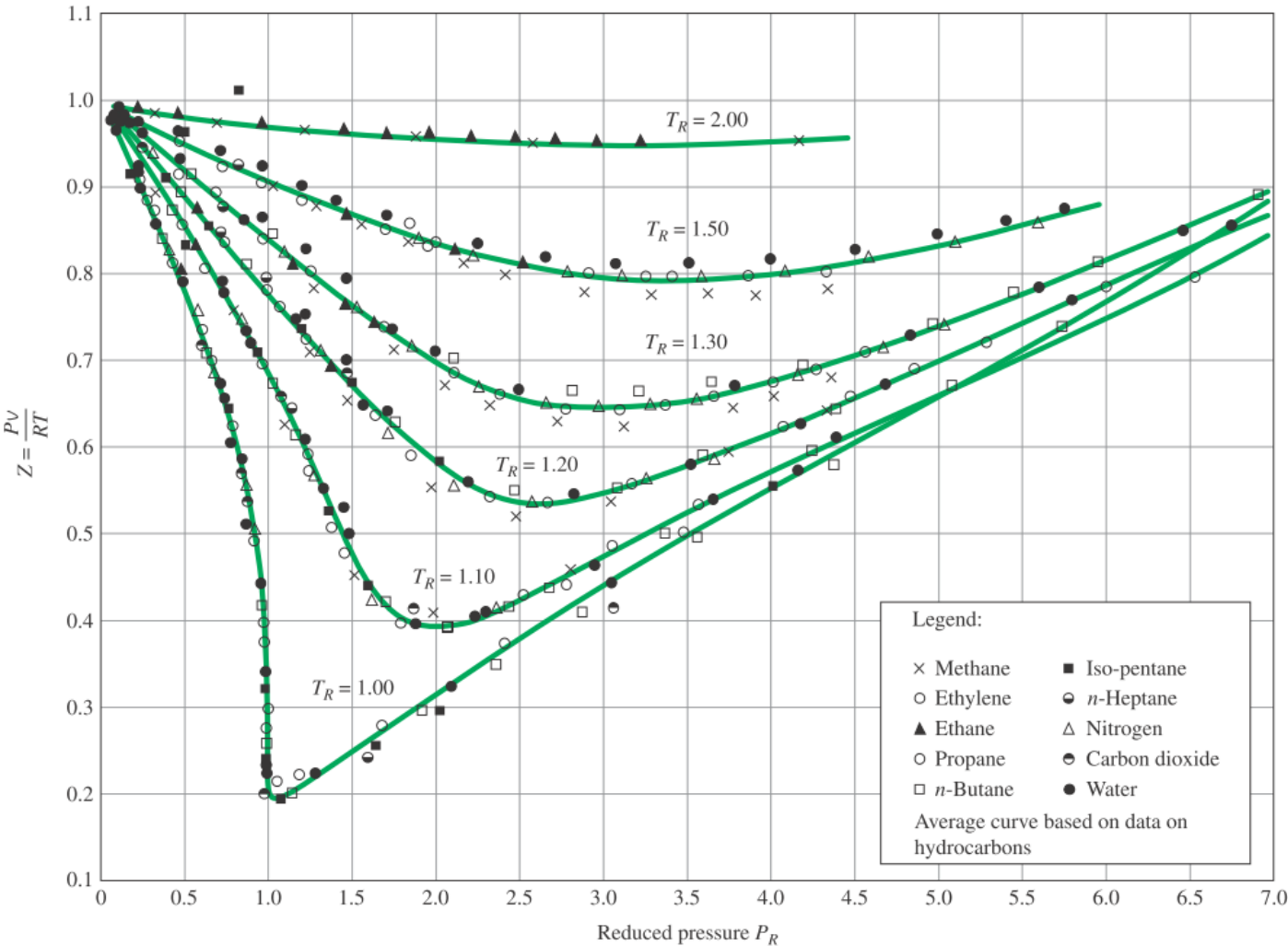
TABLO A – 1

Mol kütlesi, gaz sabiti ve kritik nokta özellikleri

Madde	Kimyasal Formül	Mol kütlesi, M kg/kmol	Gaz sabiti, R kJ/kg · K*	Kritik nokta özellikleri		
				Sıcaklık, K	Basınç, MPa	Hacim, m ³ /kmol
Hava	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Amonyak	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzen	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromin	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Büten	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Karbon dioksit	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}} ; \quad T_r = \frac{T}{T_{cr}} ; \quad v_r = \frac{v_{gerçek} P_{cr}}{R T_{cr}}$$

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



Kritik nokta
yakınlarında gazlar
mükemmel gaz
davranışından
uzaklaşırlar

Değişik gazlar için Z çarpanlarının karşılaştırılması

DİĞER HAL DENKLEMLERİ

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

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

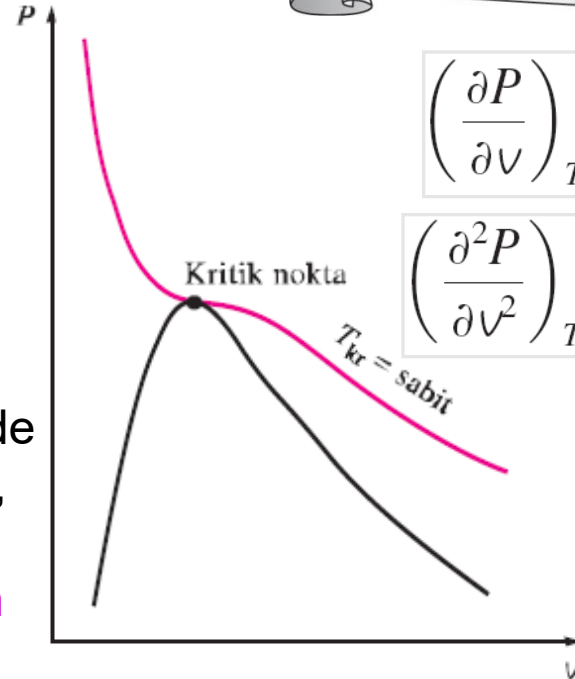


Van der Waals Hal Denklemi

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

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

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 hacim**di.



$$\left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_{T=T_{cr}=\text{const}} = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right)_{T=T_{cr}=\text{const}} = 0$$

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 pcr 'ye kadar olan yoğunluklar için oldukça hassas sonuçlar verir.

Benedict-Webb-Rubin Hal Denklemi

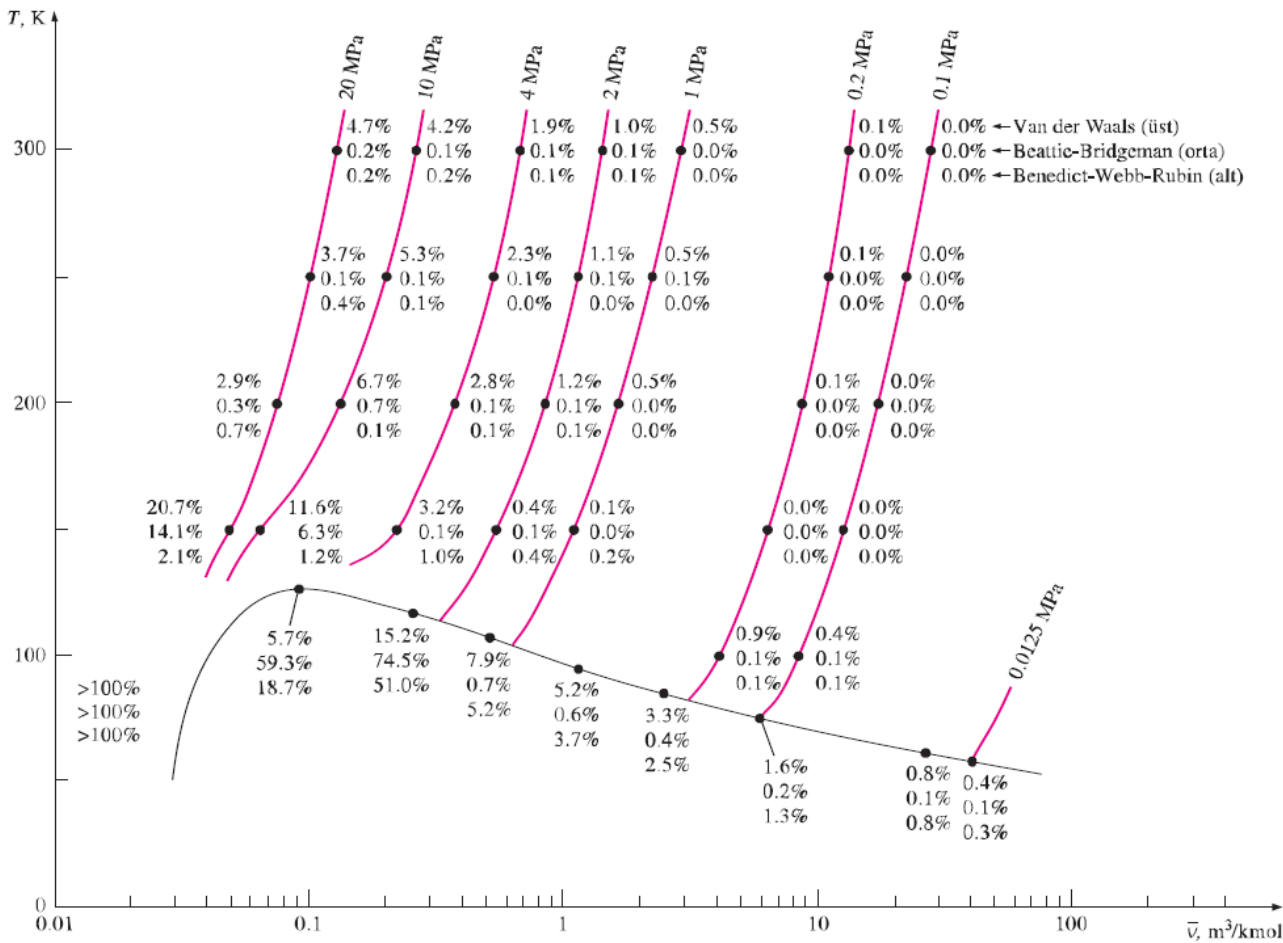
$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b R_u T - a}{\bar{v}^3} + \frac{a \alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right) e^{-\gamma/\bar{v}^2}$$

sabitlerin değerleri Tablo 3-4'de verilmiştir. Bu denklem yoğunluğu 2.5 pcr 'ye kadar olan maddelere uygulanabilir.

Etki Katsayılı Hal Denklemi

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

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



van der Waals: 2 sabit,
sınırlı aralıkta hassas sonuç verir.

Beattie-Bridgeman: 5 sabit,
 $\rho \leq 0.8 \rho_{kr}$ için hassastır.

Benedict-Webb-Rubin: 8 sabit,
 $\rho \leq 2.5 \rho_{kr}$ için hassastır.

Strobridge: 16 sabit,
Bilgisayar hesaplamaları
için daha uygundur.

Virial: Değişkendir,
hassasiyet kullanılan
terim sayısına bağlıdır.

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

Değişik hal denklemlerinin azot için verdikleri sonuçlardaki
yüzde hata (% hata = $[(|V_{\text{tablo}} - V_{\text{denklem}}|) / V_{\text{tablo}}] \times 100$

Çalışma Soruları

Soru: Su için aşağıdaki tabloyu tamamlayınız?

Durum	T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Kuruluk derecesi (x)	Faz durumu
a		325	2452		
b	170				Doymuş Buhar
c	190	2000			
d		4000	3040		

a)

TABLO A-5

Doymuş su - Basınç tablosu

Basınç., P kPa	Doyma sıcaklığı., T_{doy} °C	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	Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955

b)

TABLO A-4

Doymuş su — Sıcaklık tablosu

Sıcaklık, T °C	Özgül hacim, m^3/kg			İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg			Entropi, $kJ/(kg.K)$		
	Doymuş sıvı, $P_{\text{doymuş}}$ kPa	Doymuş sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, 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
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242

c)

TABLO A-5

Doymuş su - Basınç tablosu (Devam)

Basınç., P kPa	Doyma sıcaklığı., T_{doy} °C	Özgül hacim, m^3/kg		İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg		Entalpi, $\text{kJ}/(\text{kg.K})$			
		Doymuş Sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş Isıvı, s_f	Doymuş Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, s_g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.24	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.04	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558

c)

TABLO A-4

Doymuş su — Sıcaklık tablosu

Sıcaklık, T °C	Özgül hacim, m^3/kg			İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg			Entropi, $kJ/(kg \cdot K)$		
	Doymuş sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş buhar, u_g	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş buhar, s_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş buhar, s_g	Doymuş buhar, 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
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678

d)

TABLO A-6

Kızın su buharı (Devam)

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)
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35°C)}$					$P = 4.5 \text{ MPa (257.44°C)}$				$P = 5.0 \text{ MPa (263.94°C)}$			
Doymuş	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124

$$\frac{T_2 - T_1}{T_{son} - T_1} = \frac{u_2 - u_1}{u_{son} - u_1}$$

Enterpolasyon ile u değerine karşılık T sıcaklığı bulunur.

Soru: Su için aşağıdaki tabloyu tamamlayınız?

Durum	T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Kuruluk derecesi (x)	Faz durumu
a		325	2452		
b	170				Doymuş Buhar
c	190	2000			
d		4000	3040		

Durum	T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Kuruluk derecesi (x)	Faz durumu
a	136,27	325	2452	0,952	Doymuş sıvı-buhar
b	170	792,18	2575,7	1	Doymuş buhar
c	190	2000	806,19	-	Sıkıştırılmış (soğutulmuş) sıvı
d	466.6	4000	3040	-	Kızgın Buhar

a)

$P = 325 \text{ kPa}$ için doymuş sıvı – buhar karışımı tablosundan

$$u_f = 572,9 \text{ kJ / kg}, u_g = 2546,4 \text{ kJ / kg}, u_{fg} = 1973,5 \text{ kJ / kg}, T_d = 136,27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$u_f < u < u_g$ olduğundan doymuş sıvı – buhar karışımı

$$x = \frac{u - u_f}{u_{fg}} = \frac{2452 - 572,9}{1973,5} = 0,952$$

b)

$T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ doymuş sıvı – buhar karışımı tablosundan (TabloA – 4)

$P_d = 791,7 \text{ kPa}$ doymuş buhar olduğundan

$$u = u_g = 2576,5 \text{ kJ / kg}$$

c)

$P = 2000 \text{ kPa} = 2 \text{ MPa}$ için doymuş sıvı – buhar (TabloA – 5) tablosundan $T_d = 212,42 \text{ }^\circ\text{C}$ bulunur. $T < T_d$ olduğundan sıkıştırılmış sıvı bölge sin dedir. $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta $u \cong u_f = 806,19 \text{ kJ / kg}$

d)

$P = 4000 \text{ kPa} = 4 \text{ MPa}$ için doymuş sıvı – buhar tablosundan (TabloA – 5) $u_g = 2602,3 \text{ kJ / kg}$, $u > u_g$ olduğundan kızgın buhar bölge sin dedir. Kızgın buhar tablosundan (TabloA – 6)

$T \quad u$

$$\left\{ \begin{array}{cc} 450 & 3010,2 \\ 500 & 3099,5 \end{array} \right\} u = 3040 \text{ kJ / kg için } T = 466,68 \text{ }^\circ\text{C}$$

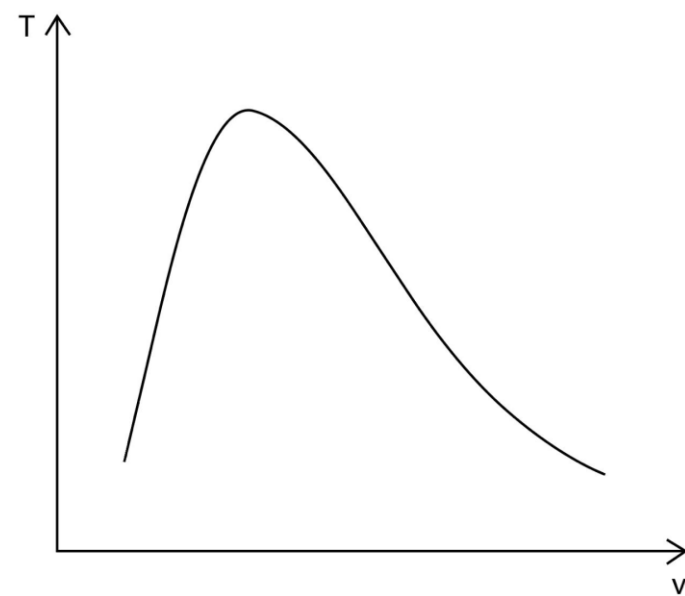
Soru Aşağıda bazı özellikleri verilen maddelerin faz durumlarını belirleyip iç enerji ve yoğunluklarını tespit ediniz ve Sıcaklık-Özgöl hacim (T-v) diyagramında yerini gösteriniz.

a) 1.2 Mpa basınç ve 300°C'de su(H_2O)

b) -20°C sıcaklık ve x=0.5 kuruluk derecesinde R-134a soğutucu akışkan

Çözüm





Soru Aşağıda bazı özellikleri verilen maddelerin faz durumlarını belirleyip iç enerji ve yoğunluklarını tespit ediniz ve Sıcaklık-Özgül hacim (T-v) diyagramında yerini gösteriniz.

a) 1.2 Mpa basınç ve 300°C'de su(H_2O)

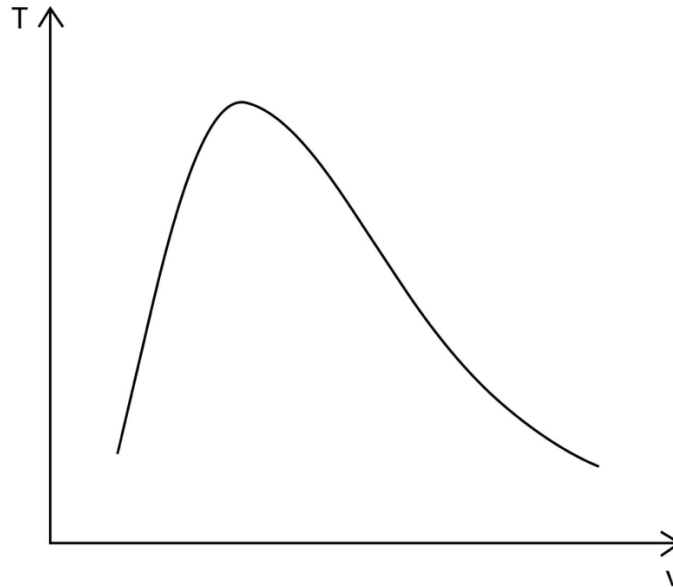
b) -20°C sıcaklık ve x=0.5 kuruluk derecesinde R-134a soğutucu akışkan

Çözüm

a) Su için basınç tablosundan $P = 1.2 \text{ Mpa}$ için $T_{doyma} = 188^\circ\text{C} < T = 300^\circ\text{C}$ olduğundan KIZGIN BUHAR

Kızgın buhar tablosundan iç enerji $u = 2789.2 \text{ kJ/kg}$ ve özgül hacim $v = 0.2138 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$v = 1/\rho, \rho = 1/0.2138 = 4.677 \text{ kg/m}^3$$



b) $x=0.5$ olduğundan DOYMUŞ SIVI-BUHAR KARIŞIMI, R-134a için sıcaklık tablosundan

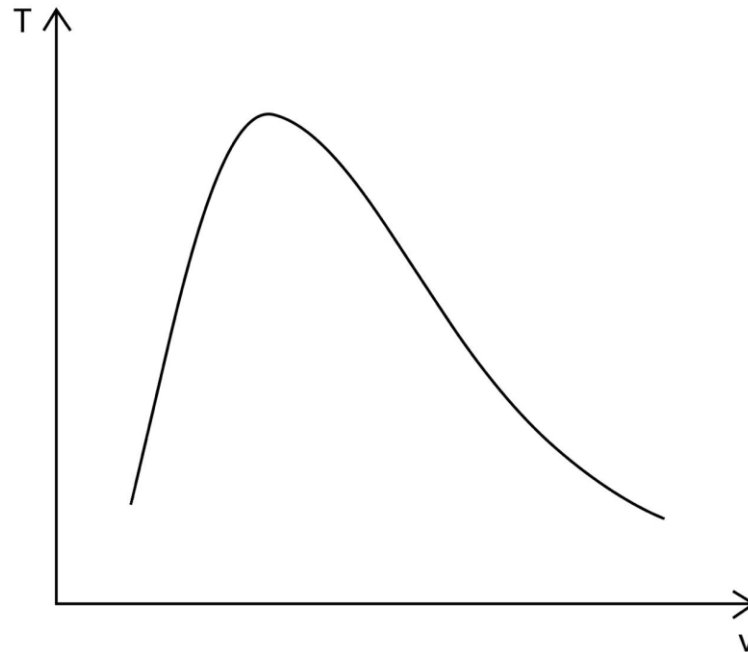
$$u_f = 24.17 \text{ kJ/kg} , u_g = 215.844 \text{ kJ/kg} , u_{fg} = u_g - u_f = 191.67 \text{ kJ/kg}$$

$$v_f = 0.0007361 \text{ m}^3/\text{kg} , v_g = 0.1464 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u = u_f + x * u_{fg} = 24.17 + 0.5 * 191.67 = 120 \text{ kJ/kg}$$

$$v = v_f + x * v_{fg} = 0.0007361 + 0.5 * (0.1464 - 0.0007361) = 0.07356 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho = 1/v = 13.59 \text{ kg/m}^3$$



Örnek: 100 litre hacmindeki bir otomobil lastiği kışın sıcaklık 0 °C iken içerisindeki basınç manometreden 210 kPa oluncaya kadar azot gazı ile şişirilmektedir. Buna göre;

a) Lastiğe basılan azot miktarını belirleyiniz.

b) Yazın sıcaklığın 37 °C olduğu zamanda aynı lastiğin basıncı manometreden ne okunur? (Atmosfer basıncını 100 kPa ve lastikten azot kaçağı olmadığını ve lastik hacminin değişmediğini kabul ediniz, $R_{\text{azot}}=0,2968 \text{ kJ/kgK}$)

Çözüm:

$$V_1 = 100 \text{ lt} = 0,1 \text{ m}^3, \quad T_1 = 0 + 273 = 273 \text{ K}, \quad T_2 = 37 + 273 = 310 \text{ K}$$

$$P_1 = 100 + 210 = 310 \text{ kPa}$$

$$m_1 = \frac{P_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{310 \cdot 0,1}{0,2968 \cdot 273} = 0,3826 \text{ kg} = m_2$$

$$P_2 \cdot V_2 = m_2 \cdot R \cdot T_2 \Rightarrow P_2 = \frac{m_2 \cdot R \cdot T_2}{V_2} = \frac{0,3826 \cdot 0,2968 \cdot 310}{0,1} = 352 \text{ kPa}$$

$$P_2 = P_{\text{atm}} + P_{g,2} \Rightarrow P_{g,2} = P_2 - P_{\text{atm}} \Rightarrow P_{g,2} = 352 - 100 = 252 \text{ kPa}$$

Soru Bir otomobil lastiği içindeki havanın gösterge basıncı 210 kPa ve sıcaklığı 25 °C'dir. Lastiğin hacmi 0.025 m³ olduğuna göre, hava sıcaklığı 50 °C'ye yükseldiğinde lastik içindeki basınç ne olur? Bu sıcaklıkta basıncı ilk haline getirmek için ne kadar hava dışarı atılmalıdır, hesaplayınız. **Not:** Atmosfer basıncı 100 kPa'dır. $R_{\text{hava}}=0.287$ kJ/kgK, Lastiğin hacmi tüm işlem boyunca sabit kabul edilecektir.

Çözüm $P_1 = 210 \text{ kPa}$, $T_1 = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$, $V_1 = V_2 = 0.025 \text{ m}^3$

a) $T_2 = 50^\circ\text{C} = 323 \text{ K}$, $P_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$, $P_2 = ?$

b) $P_2 = P_1 = 310 \text{ kPa}$, $\Delta m = m_2 - m_1 = ?$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow P_2 = \frac{P_1 * T_2}{T_1} = \frac{310 \text{ kPa} * 323 \text{ K}}{298 \text{ K}} = 336 \text{ kPa}$$

$$m_1 = \frac{P_1 * V_1}{R * T_1} = \frac{310 \text{ kPa} * 0.025 \text{ m}^3}{0.287 * 298 \text{ K}} = 0.0906 \text{ kg}$$

$$m_2 = \frac{P_2 * V_2}{R * T_2} = \frac{310 \text{ kPa} * 0.025 \text{ m}^3}{0.287 * 323 \text{ K}} = 0.0836 \text{ kg}$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 0.007 \text{ kg}$$

Soru: 0,4 m³ hacminde 6 bar basınçta 2 kg sıvı-buhar karışımı dengeli olarak bir kapta bulunmaktadır.

a) Karışımdaki sıvının hacim ve kütlesini bulunuz?

b) Karışımdaki buharın hacim ve kütlesini hesaplayınız?

Çözüm:

$$\left. \begin{array}{l} P = 6 \text{ bar} \\ \text{Doymuş sıvı - buhar} \end{array} \right\} v_f = 0,001101 \text{ m}^3 / \text{kg}, v_g = 0,3157 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$V = 0,4 \text{ m}^3 \quad m = 2 \text{ kg} \Rightarrow V = m.v \Rightarrow v = \frac{V}{m} = \frac{0,4}{2} = 0,2 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v = v_f + x(v_{fg}) \Rightarrow x = \frac{0,2 - 0,001101}{0,3146} = 0,6322$$

a)

$$x = \frac{m_g}{m} \rightarrow m_g = 0,6322.2 = 1,2644 \text{ kg}$$

$$m = m_f + m_g \rightarrow m_f = m - m_g = 2 - 1,2644 = 0,7356 \text{ kg}$$

$$V_f = m_f \cdot v_f = (0,7356) \cdot (0,001101) = 0,0008099 \text{ m}^3$$

b)

$$V_g = m_g \cdot v_g = (1,2644) \cdot (0,3157) = 0,3991 \text{ m}^3$$

TABLO A-5

Doymuş su - Basınç tablosu

Basınç., P kPa	Doyma sıcaklığı., T_{doy} °C	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	Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Örnek 1: Su için tabloda eksik alanları doldurunuz?

T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	Faz durumu
140	361,53	0,05	Doymuş sıvı + buhar
155,46	550	0,001097	doymuş sıvı
125	750	0,001065	Sıkıştırılmış sıvı
500	2500	0,14	Kızgın buhar

Çözüm 1:

T (°C)	P (kPa)	v (m ³ /kg)	Faz durumu
140	361,53	0,05	doymuş sıvı+buhar
155,46	550	0,001097	doymuş sıvı
125	750	0,001065	sıkıştırılmış sıvı
500	2500	0,14	kızgın buhar

Örnek 2: R-134 a için tabloda eksik alanları doldurunuz?

T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	Faz durumu
-8	320		
30		0,015	
	180		doymuş buhar
80	600		

Çözüm 2:

T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	Faz durumu
-8	320	0,0007569	sıkıştırılmış sıvı
30	770,64	0,015	doymuş sıvı+buhar
-12,73	180	0,11041	doymuş buhar
80	600	0,044710	kızgın buhar

Örnek 3: Su için tabloda eksik alanları doldurunuz?

T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Faz durumu
143,61	400	1450	Doymuş sıvı+buhar
220	2319,6	2601,3	doymuş buhar
190	2500	806	Sıkıştırılmış sıvı
466,21	4000	3040	Kızgın buhar

Çözüm 3:

T (°C)	P (kPa)	u (kJ/kg)	Faz durumu
143,61	400	1450	doymuş sıvı+buhar
220	2319,6	2601,3	doymuş buhar
190	2500	805,15	sıkıştırılmış sıvı
466,21	4000	3040	kızgın buhar

Kaynaklar

1. Yunus Çengel and Michael A. Bowles, Thermodynamics: An engineering approach, McGraw Hill Book Company, Seventh Edition, 2010.
2. Hüsamettin Bulut, Çözümlü Termodinamik Problemleri Notları, Şanlıurfa 2017.