

# Chapter 2

## PROPERTIES OF PURE SUBSTANCES

خواص ماده خالص:

### 1-2) مادهی خالص<sup>1</sup>:

مادهای که دارای ترکیب شیمیایی یکسان باشد را مادهی خالص گویند (N . He . Co<sub>2</sub> - آب) یک مادهی خالص یک عنصر و یا یک ترکیب شیمیایی منفرد نیست. مخلوطی از عناصر و یا ترکیبات شیمیایی نیز تا زمانی که همگن باقی بمانند یک ماده خالص را تشکیل می دهند. (هوا یک ماده خالص است). مخلوطی از دو یا چند فاز از یک مادهی خالص تا زمانی که ترکیب شیمیایی آن در تمام فازها یکسان باقی بماند مادهای خالص خواهد بود. (مثلاً مخلوطی از یخ و آب یک مادهی خالص را تشکیل می دهند). اما مخلوطی از هوای گازی شکل و هوای مایع یک مادهی خالص را تشکیل نمی دهند. زیرا ترکیب شیمیایی این دو با هم متفاوت می باشد. و این به دلیل وجود عناصر مختلفی است که در هوا وجود دارند و در فشارهای خاصی دارای دماهای میعان متفاوتی هستند.

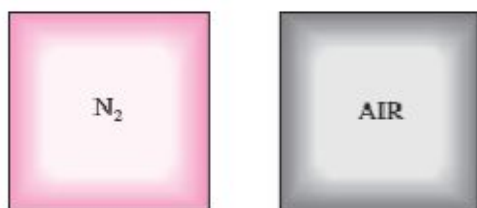


FIGURE 3-1

Nitrogen and gaseous air are pure substances.

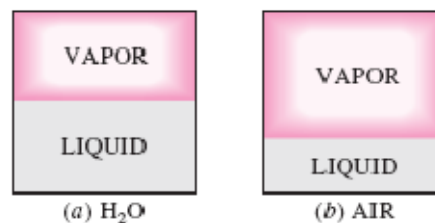


FIGURE 3-2

A mixture of liquid and gaseous water is a pure substance, but a mixture of liquid and gaseous air is not.

<sup>1</sup> . pure Substance

## 2-2) فاز<sup>۱</sup>:

یک فاز به عنوان یک آرایش مولکولی مجزا که همه جا یکنواخت می‌باشد و می‌توان آن را از دیگر آرایش‌ها، با سطوح مرزی مشخصی به سادگی جدا کرد تعریف می‌شود.

سرعت ارتعاش مولکول‌ها در جامدات به دما بستگی دارد. هنگامی که یک جامد به مایع تبدیل شود فواصل بین مولکولها معمولاً کمی افزایش می‌یابد (باستثناء آب) در گازها، مخصوصاً در چگالی‌های کم، نیروهای بین مولکولی بسیار کوچک است و تنها تأثیر متقابل بین مولکول‌ها برخورد آنها با یکدیگر می‌باشد. در فاز گازی مولکولها از نظر انرژی در سطح بسیار بالاتری نسبت به فاز مایع و جامد قرار دارند. بنابراین گاز باید مقدار زیادی انرژی از دست بدهد تا بتواند به مایع یا جامد تبدیل شود.

## مایع تحت فشار<sup>۲</sup> (مادون سرد<sup>۳</sup>) و مایع اشباع<sup>۴</sup>:

یک طرح سیلندر پیستون را که شامل آب مایع با دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و فشار یک اتمسفر است را در نظر بگیرید. تحت این شرایط آب در فاز مایع قرار دارد و مایع تحت فشار و یا مایع مادون سرد نامیده می‌شود. حال به آب حرارت می‌دهیم تا آنکه دمای آن مثلاً به  $40^{\circ}\text{C}$  برسد. هنگام افزایش دما، آب کمی منبسط می‌شود و در نتیجه حجم مخصوص آن افزایش می‌یابد. در حین این انبساط، پیستون اندکی به بالا حرکت می‌کند. در طی این فرآیند فشار داخل سیلندر در  $1\text{ atm}$  ثابت باقی می‌ماند. زیرا در اینجا فشار به فشار بارومتری خارج و وزن پیستون بستگی دارد که هر دوی آنها ثابت می‌باشند. در این حالت آب هنوز یک مایع متراکم می‌باشد زیرا شروع به بخار شدن نکرده است. اگر گرمای بیشتری به آب انتقال داده شود همچنان به بالا رفتن خود تا  $100^{\circ}\text{C}$  ادامه می‌دهد. در این نقطه آب هنوز به صورت مایع است اما هر گونه حرارت اضافی هر چقدر هم اندک باشد باعث خواهد شد تا بخشی از آب بخار شود، به عبارت دیگر فرآیند تغییر فاز از مایع به بخار در حال آغاز شدن است. به مایعی که در حال بخار شدن می‌باشد مایع اشباع گفته می‌شود.

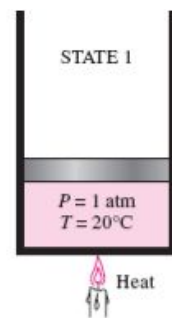


FIGURE 3-6

At 1 atm and  $20^{\circ}\text{C}$ , water exists in the liquid phase (compressed liquid).

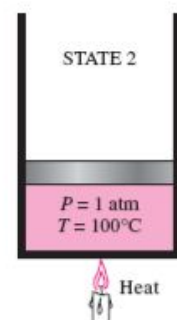


FIGURE 3-7

At 1 atm pressure and  $100^{\circ}\text{C}$ , water exists as a liquid that is ready to vaporize (saturated liquid).

1. Phase
2. Compressed liquid
3. Sub cooled liquid
4. Saturated liquid

## بخار اشباع<sup>۱</sup> و بخار فوق گرم<sup>۲</sup>:

به محض این که عمل جوشیدن شروع می شود تا زمانی که تمامی مایع کاملاً بخار شود، دما افزایش نخواهد یافت. به عبارت دیگر در فشار ثابت در طول کل فرآیند تغییر فاز دما ثابت باقی می ماند. در طی فرآیند تبخیر تنها تغییری که مشاهده می کنیم افزایش بسیار در حجم و کاهش پیوسته سطح مایع در نتیجه تبدیل مایع به بخار می باشد.

تقریباً در محدوده نقطه میانی خط بخار، سیلندر حاوی مقادیر یکسانی از مایع و بخار می باشد. اگر همچنان به گرما دادن ادامه دهیم، تبخیر شدن ادامه یافته تا اینکه آخرین قطره مایع تبخیر گردد. در این حالت کل سیال درون سیلندر بصورت بخار است و در روی خط مرز بخار اشباع قرار دارد. هر افت گرمایی از مخزن باعث تقطیر مقداری از بخار می گردد. بخاری که در حول و حوش (مرز) تقطیر شدن قرار دارد، **بخار اشباع** نامیده می شود.

بعد از اینکه فرآیند تغییر فاز مایع به بخار تکمیل گردید، دوباره یک ناحیه تک فازی (این بار فاز بخار) خواهیم داشت و انتقال بیشتر گرما باعث افزایش دما و حجم مخصوص بخار می گردد. در حالت 5، دمای بخار به عنوان مثال  $300^{\circ}\text{C}$  می باشد و اگر مقداری گرما از بخار گرفته شود هیچ تقطیری صورت نخواهد گرفت، مگر اینکه دما به  $100^{\circ}\text{C}$  (برای فشار یک اتمسفر) برسد. بخاری که در حول و حوش (مرز) تقطیر شدن قرار نداشته باشد (یعنی بخاری غیر از بخار اشباع)، **بخار فوق گرم** نامیده می شود.

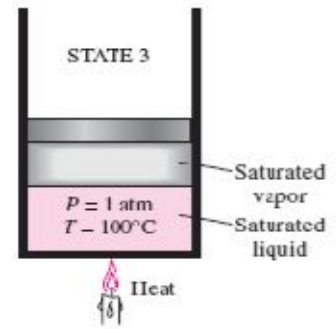


FIGURE 3-8

As more heat is transferred, part of the saturated liquid vaporizes (*saturated liquid-vapor mixture*).

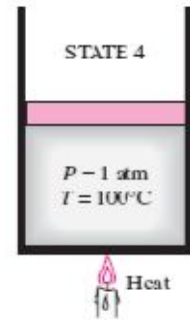


FIGURE 3-9

At 1 atm pressure, the temperature remains constant at  $100^{\circ}\text{C}$  until the last drop of liquid is vaporized (*saturated vapor*).

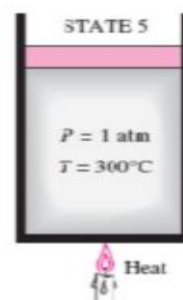


FIGURE 3-10

As more heat is transferred, the temperature of the vapor starts to rise (*superheated vapor*).

<sup>1</sup>. Saturated vapor

<sup>2</sup>. Super heated vapor

فرآیند تغییر فاز در فشار ثابت که در فوق تشریح گردید، در نمودار  $T - v$  نشان داده شده است.

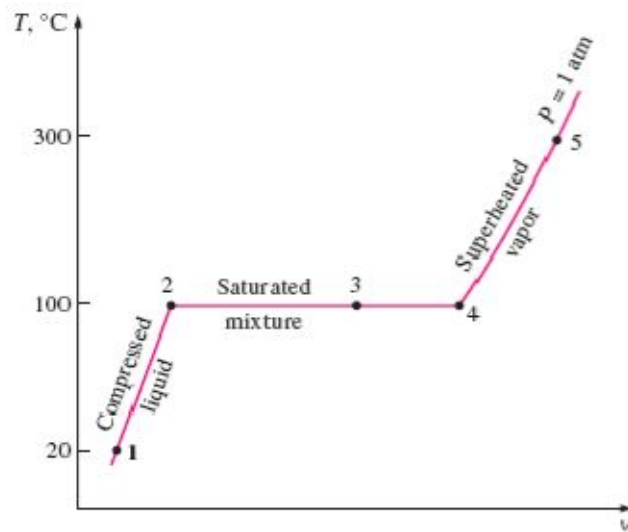


FIGURE 3-11

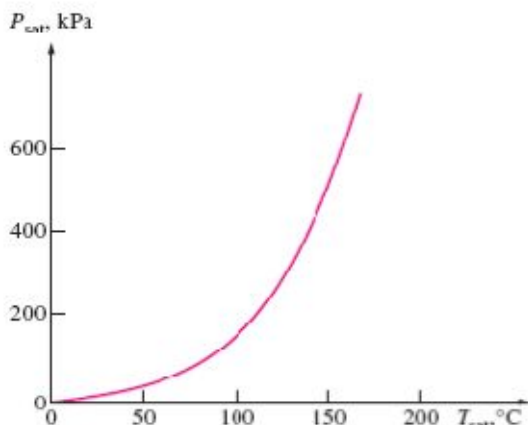
$T-v$  diagram for the heating process of water at constant pressure.

اگر جهت کل فرآیند با سرد کردن بخار در فشار ثابت معکوس گردد، آب به حالت 1 باز خواهد گشت و مسیر یکسانی تکرار خواهد شد و در چنین حالتی مقدار گرمای آزاد شده در طی فرآیند خنک سازی دقیقاً برابر مقدار گرمای داده شده در طی فرآین گرمادهی (گرمای) می باشد.

دمایی را که در آن آب شروع به جوشیدن می کند به فشار بستگی دارد. پس اگر ما فشار را ثابت نگه داریم دما نیز ثابت می ماند.

در یک فشار معلوم، دمایی را که یک ماده ی خالص در آن شروع به جوشیدن می کند، دمای اشباع نامیده می شود. ( $T_{sat}$ )

در یک دمای معلوم، فشاری را که یک ماده ی خالص در آن شروع به جوشیدن می کند، فشار اشباع نامیده می شود. ( $P_{sat}$ )



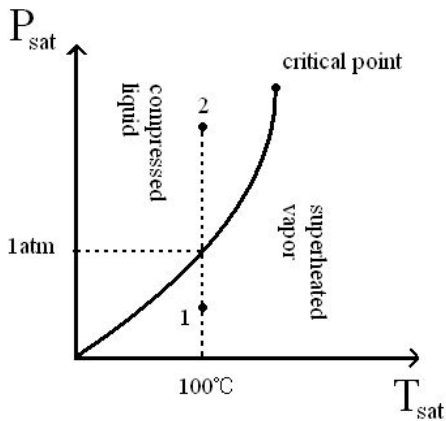
در طی فرآیند تغییر فاز، دما و فشار خواص وابسته به هم بوده و رابطه معینی بین آنها برقرار است، یعنی:

$$T_{sat} = f(P_{sat})$$

در یک نمودار که دما و فشار اشباع بر حسب یکدیگر رسم شده باشند، رفتار تغییر دمای اشباع بر حسب فشار

اشباع مانند نمودار مقابل می باشد. این منحنی به **منحنی بخار-مایع** اشباع موسوم است.

مثال:



$$1 \begin{cases} P_1 < 1 \text{ atm} \Rightarrow T_{sat_1} < 100 \\ T_1 = 100^\circ\text{C} \end{cases} \xrightarrow{\text{if } T_1 > T_{sat_1}} \text{Compressed liquid}$$

$$2 \begin{cases} P_2 > 1 \text{ atm} \Rightarrow T_{sat_2} > 100 \\ T_2 = 100^\circ\text{C} \end{cases} \xrightarrow{\text{if } T_2 < T_{sat_2}} \text{Superheated vapor}$$

نتیجه: در دیاگرام فشار اشباع - دمای اشباع:

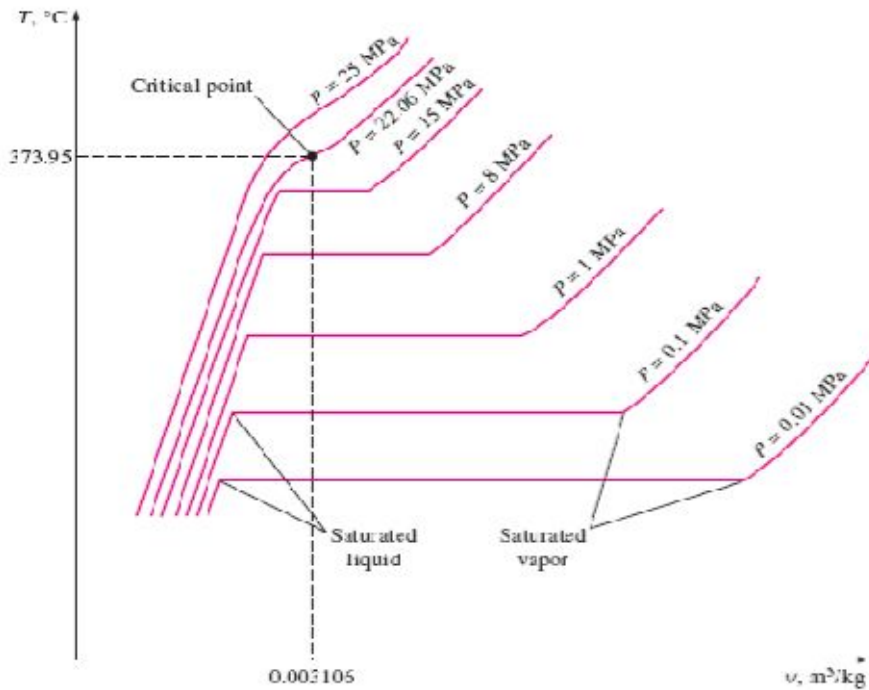
نقطه در قسمت **compressed liquid** است. اگر:  $T < T_{sat} \Rightarrow$

نقطه در قسمت **superheated vapor** است. اگر:  $T > T_{sat} \Rightarrow$

### 3-2) نمودار خواص برای فرآیندهای تغییر فاز

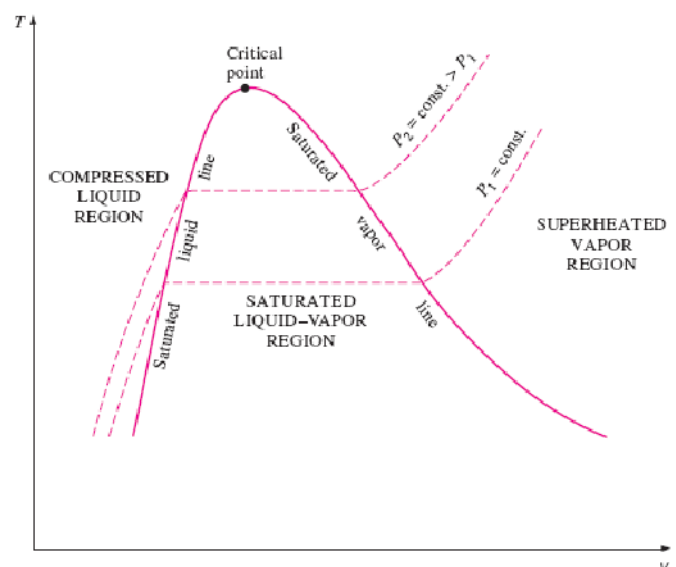
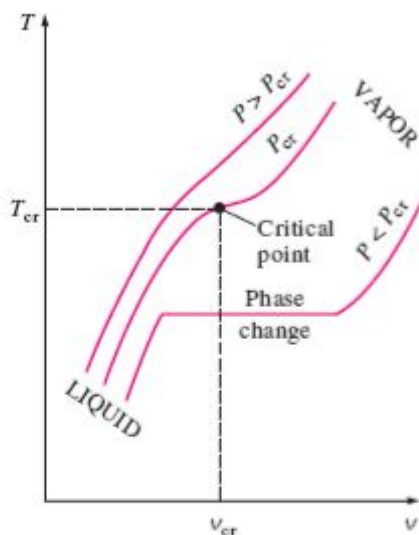
تغییرات خواص در طی فرآیندهای تغییر فاز با استفاده از نمودارهای خواص به بهترین نحو قابل مطالعه می باشند.

# 1- نمودار $T - v$



**FIGURE 3-16**

$T$ - $v$  diagram of constant-pressure phase-change processes of a pure substance at various pressures (numerical values are for water).



**FIGURE 3-17**

At supercritical pressures ( $P > P_{cr}$ ), there is no distinct phase-change (boiling) process.

## نقطه‌ی بحرانی<sup>1</sup>:

نقطه‌ای که در آن مایع اشباع و بخار اشباع بر هم منطبق می‌شوند. دما، فشار و حجم مخصوص یک ماده در نقطه‌ی بحرانی به ترتیب: دمای بحرانی  $T_{cr}$ ، فشار بحرانی  $P_{cr}$  و حجم مخصوص بحرانی  $V_{cr}$  نامیده می‌شوند.

متداول است که در دمای بالاتر از دمای بحرانی به ماده، بخار مافوق گرم و در دمای پایین تر از دمای بحرانی به ماده، مایع تحت فشار اطلاق می‌شود.

توجه: دمای اشباع آب در فشار 1 اتمسفر برابر 100 درجه است.

$$T_{sat} \begin{cases} T = 100^{\circ}\text{C} \\ P = 1\text{atm} \end{cases}$$

نکته:

Elevation(m) <small>(ارتفاع از سطح دریا)</small>	$P_{atm}$ (KPa)	$T_{sat}$
0	101.325	100 <sub>c</sub>
100	89.55	96.3 <sub>c</sub>

در نتیجه: به ازای هر 1000 متر که از سطح دریا بالاتر می‌رویم، 10 تا 11 کیلو پاسکال فشار کاهش می‌یابد و دما هم 3/5 درجه کاهش می‌یابد.

### نتایج بر گرفته شده از نمودارهای $T - v$ :

- 1- در طی فرآیند فوق گرم، دما و حجم مخصوص در فشار ثابت افزایش می‌یابند.
- 2- افزایش فشار موجب کاهش حجم مخصوص بخار اشباع و افزایش حجم مخصوص مایع اشباع شده و همچنین ماده خالص در دمای بالاتر شروع به جوشیدن می‌کند.
- 3- در فشار بحرانی که برای آب  $22.09 \text{ Mpa}$  می‌باشد ملاحظه می‌شود که فرآیند تبخیر در دمای ثابت وجود ندارد.

<sup>1</sup>. Critical point

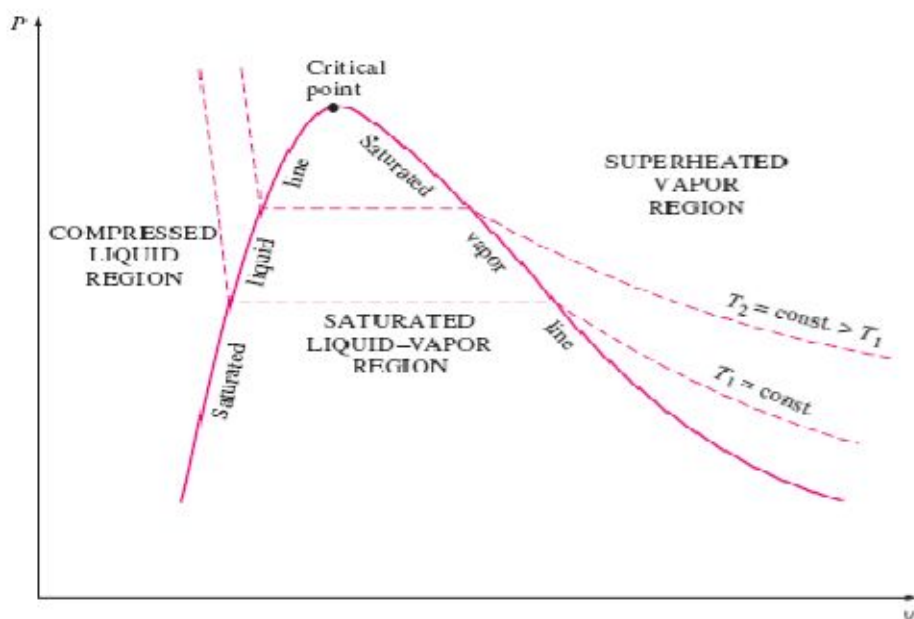
4- نقطه عطف نمودار همان نقطه بحرانی است.

5- در فشارهای بیش از فشار بحرانی فرآیند تغییر فاز مشخصی وجود ندارد و هرگز دو فاز وجود نخواهد داشت بلکه چگالی به طور پیوسته تغییر می‌کند و همیشه فقط یک فاز دارد. همچنین در این حالت حجم مخصوص دائما افزایش می‌یابد.

6- در فشارهای بالای فشار بحرانی همیچ وقت نمی‌توانیم مرز مایع و بخار را تعیین کنیم. در این حالت ماده را سیال گوئیم. البته در دمای کمتر از دمای بحرانی معمولا ماده را مایع متراکم و در دمای بالای دمای بحرانی آن را بخار فوق گرم گوئیم.

7- نمودار  $T - v$  شمال دو ناحیه تک فاز مایع متراکم و بخار فوق گرم در دو طرف چپ و راست نمودار و یک ناحیه مخلوط اشباع مایع - بخار یا ناحیه خیس می‌باشد.

## 2- نمودار $P - v$



نتایج بر گرفته از نمودار  $P - v$  عبارتند از:

- 1- شکل نمودار  $P - v$  خیلی شبیه نمودار  $T - v$  اما شیب خطوط دما ثابت به طرف پایین است.
- 2- در ابتدا با کاهش فشار در دمای ثابت حجم تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد. تا زمانی که فشار با فشار اشباع برابر شود.



3- در ضمن فرآیند تغییر فاز اگر فشار را کاهش دهیم دما نیز افت کرده و از آنجا که  $T_{sat} = f(P_{sat})$  نمی توان گفت فرآیند تک دما است.

4- در فرآیند تبخیر، دما و فشار ثابت می مانند اما حجم مخصوص افزایش می یابد.

5- بعد از فرآیند تبخیر کاهش فشار باعث افزایش بیشتر حجم مخصوص می شود.

### توسعه نمودارها برای در بر گرفتن حالت جامد:

دو نمودار تعادل که تا کنون بسط و شرح داده شدند، بیانگر حالت تعادل در فازهای مایع و بخار می باشند. اما این نمودارها را به راحتی می توانیم توسعه داده تا نواحی اشباع جامد - مایع و همچنین جامد بخار را در بر گیرد. اصولی که در فرآیند تبخیر فاز مایع - بخار مورد بحث قرار گرفتند، برای فرآیند های تغییر فاز جامد - مایع و همچنین جامد - بخار قابل اعمال می باشند. اغلب مواد در حین انجماد (یخ زدن) منبسط می شوند. نمودارهای  $P - v$  برای هر دو گروه از مواد در شکل های زیر نشان داده شده است. این دو نمودار تنها در ناحیه اشباع مربوط به جامد - مایع با یکدیگر تفاوت دارند. نمودارهای  $T - v$  مخصوصا در مواردی که ماده در طی انجماد حجم منقبض می شود، به نمودارهای  $P - v$  شباهت زیادی دارند.

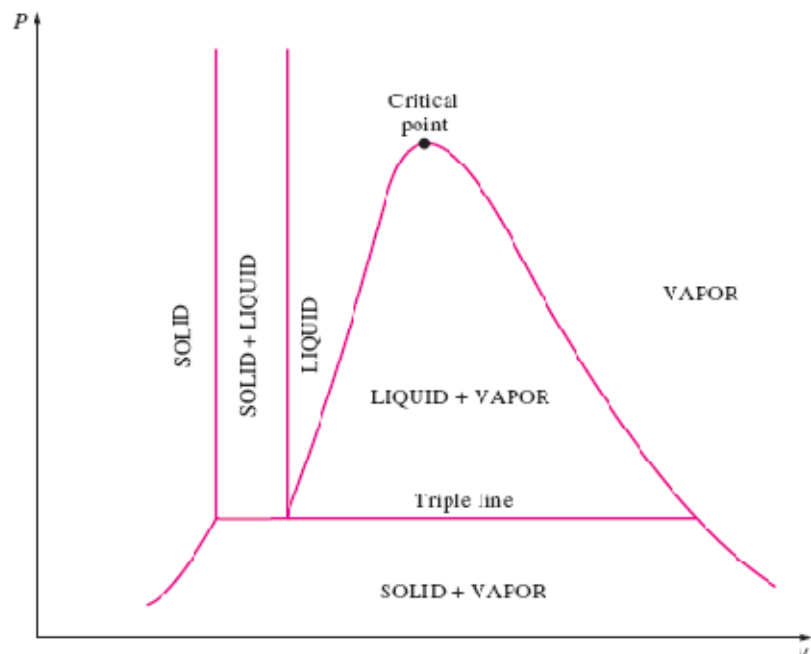
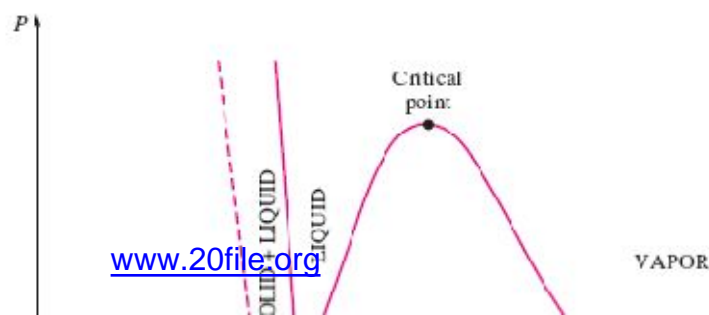


FIGURE 3-21

$P-v$  diagram of a substance that contracts on freezing.



### 3- نمودار $P - T$ :

شکل زیر دیاگرام  $P - T$  یک ماده خالص را نشان می‌دهد. این نمودار اغلب دیاگرام فاز نامیده می‌شود، چرا که هر سه فاز ماده توسط سه خط از یکدیگر جدا می‌شوند. خط تصعید، نواحی جامد و بخار را از هم جدا می‌کند. خط تبخیر، نواحی مایع و بخار را تقسیم می‌نماید و خط انجماد نواحی جامد و مایع را از هم تفکیک می‌دهد. این سه خط در نقطه سه گانه، جایی که هر سه فاز ماده در تعادل با یکدیگر قرار دارند به یکدیگر می‌رسند. خط تبخیر تا نقطه بحرانی امتداد می‌یابد، چرا که در دمای بالای نقطه بحرانی هیچ تفاوتی میان فازهای بخار و مایع نمی‌توان یافت. موادی که در انجماد، منبسط می‌گردند تنها اختلافشان با موادی که در انجماد منقبض می‌گردند، در خط ذوب نمودار  $P - T$  آنها است.

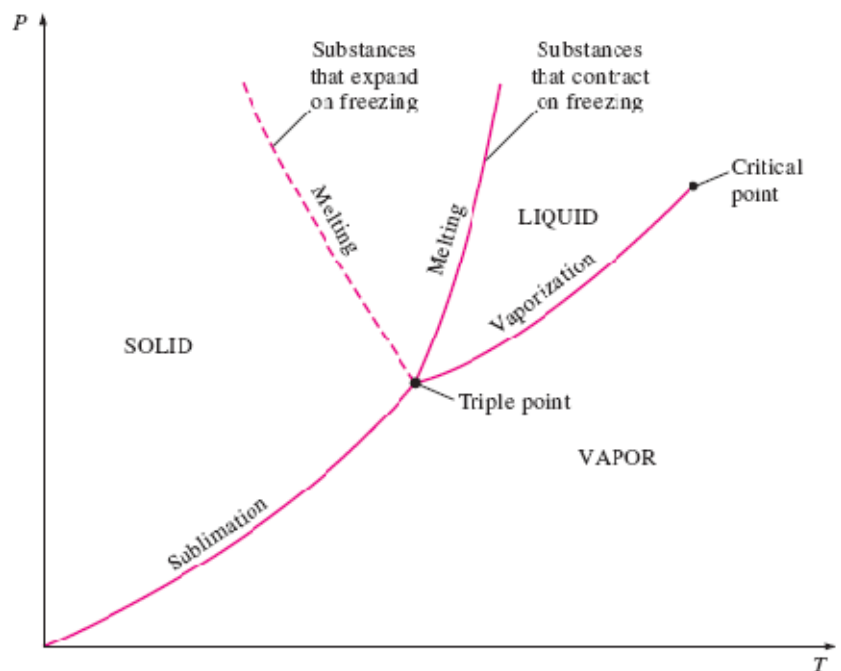


FIGURE 3-25  
 $P-T$  diagram of pure substances.

نتایج برگرفته از نمودار  $P - T$ :

- 1- حجم مخصوص اکثر مواد در فرآیند ذوب افزایش می‌یابد اما برخی مواد نظیر آب دارای حجم مخصوص مایع کمتر از آب جامد است.
- 2- با ذوب شدن یخ، انتقال حرارت بیشتر باعث افزایش دمای مایع می‌شود.
- 3- یخ در فرآیندی به نام تصعید مستقیماً از فاز جامد به بخار تبدیل می‌شود. انتقال حرارت بیشتر در این حالت، بخار را فوق گرم می‌کند.
- 4- خط تبخیر به نقطه بحرانی ختم می‌شود. در بالای نقطه بحرانی نقطه بحرانی هیچ تمایز مشخصی بین فاز مایع وجود ندارد و در واقع در فشار بیشتر از فشار بحرانی تعادل فازهای مایع و بخار غیر ممکن است.
- 5- موادی که با انجماد منبسط یا منقبض می‌شوند تنها اختلافشان مربوط به خط ذوب در نمودار  $P - T$  است که در شکل نشان داده شده است.
- 6- در فشارهای کمتر از فشار نقطه سه گانه با افزایش دما در فشار ثابت ماده مستقیماً از جامد به بخار تبدیل می‌شود.
- 7- در خط فشار ثابت که از نقطه سه گانه می‌گذرد سه فاز با هم در تعادل می‌باشند.
- 8- در فشارهای بیش از فشار بحرانی هیچ تمایزی بین فازهای مایع و بخار وجود ندارد.
- 9- در فشارهای بالاتر از فشار نقطه سه گانه و کمتر از فشار بحرانی ( $P_{triple} < P < P_{Cr}$ ) با افزایش دما در فشار ثابت، ماده از حالت جامد به مایع و سپس در دمای بالاتر از مایع به بخار تبدیل می‌شود. جامد اشباع: در حالتی که یخ ذوب می‌شود و دمای آن ثابت می‌ماند در این حالت یخ را جامد اشباع می‌گویند.

## نکات:

- 1- یک ماده خالص می‌تواند چند نقطه سه گانه داشته باشد اما فقط در یکی از این نقاط سه گانه است که جامد مایع و بخار در تعادل اند و در سایر نقاط سه گانه دو. فاز جامد و یک فاز مایع، دو فاز جامد و یک فاز بخار، یا سه فاز جامد می‌توانند در تعادل باشند.
- 2- هیچ ماده‌ای در فشارهای کمتر از فشار سه گانه نمی‌تواند به صورت فاز مایع در تعادل پایدار باشد.
- 3- در نمودارهای  $P - v$  و  $T - v$  حالت‌های فاز سه گانه به صورت یک خط به نام خط سه گانه را تشکیل می‌دهند. خط سه گانه روی نمودار  $P - T$  به صورت یک نقطه ظاهر می‌شود. که نقطه‌ی سه گانه گویند.

- 4- حالت‌های واقع بر خط سه گانه یک ماده دارای دما و فشار یکسان ولی حجم مخصوص متفاوتند.
- 5- حالت یک ماده خالص تراکم پذیر ساده توسط دو خاصیت مستقل تعریف می‌شود. به عنوان نمونه حالت بخار آب فوق گرم توسط دو خاصیت مستقل دما و حجم مخصوص تعیین می‌شود.
- 6- حالت های مایع اشباع و بخار اشباع یک ماده خالص دارای فشار و دمای یکسان هستند اما با این تفاوت که حالتشان متفاوت است لذا نتیجه می‌گیریم برای حالت اشباع فشار و دما خواص مستقلی نیستند.
- 7- برای تعیین حالت اشباع یک ماده خالص دو خاصیت مستقل مانند فشار و حجم مخصوص یا فشار و کیفیت و دم و حجم مخصوص نیازاند.
- 8- مخلوط گازها تا وقتی به صورت تک فاز است، دارای مشخصات ماده خالص است. مثلاً هوا که مخلوطی از گازها است، تا وقتی که در فاز گازی است، با دو خاصیت مشخص می‌شود لذا، هوا را می‌توان یک ماده خالص در نظر گرفته است.

## 4-2) جداول خواص

برای اغلب مواد، روابط بین خواص ترمودینامیکی بسیار پیچیده تر از آن است که توسط روابط ساده‌تر قابل بیان باشند. بنابراین خواص را غالباً در فرم جداول ارائه می‌نمایند.

نکته: حاصلضرب فشار در حجم دارای انرژی می‌باشد.



FIGURE 3-29

The product *pressure* × *volume* has energy units.

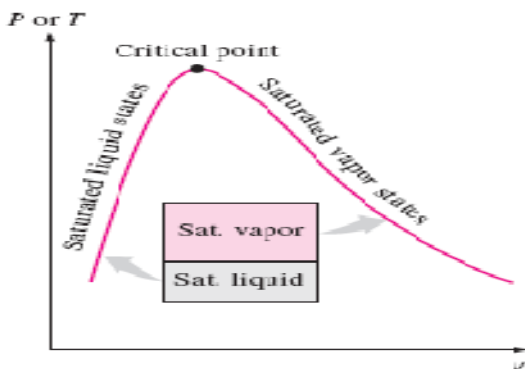
### 1- الف) حالات مایع اشباع و بخار اشباع

خواص مایع اشباع و بخار اشباع برای آب در جدول A-4 و A-5 آورده شده‌اند. هر دو جدول داده شده اطلاعات

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

مشابهی را در اختیار قرار می دهند. تنها اختلاف موجود این است که در جدول A-4 خواص بر حسب دما و در جدول A-5 خواص بر حسب فشار داده شده اند. بنابراین ساده تر آن است که در مواقعی که دما داده شده است، از جدول A-4 و در مواقعی که فشار داده شده است از جدول A-5 استفاده شده است. نحوه استفاده از جدول در شکل مقابل نشان داده شده است. پانویس  $f$  برای نشان دادن خواص مایع اشباع و پانویس  $g$  برای نشان دادن خواص بخار اشباع مورد استفاده قرار گرفته است.

### 1- (ب) مخلوط بخار - مایع اشباع



**FIGURE 3-34**

The relative amounts of liquid and vapor phases in a saturated mixture are specified by the quality  $x$ .

در طی فرایند تبخیر، قسمتی از ماده بصورت مایع و قسمتی بصورت بخار موجود می باشد به این معنی که مخلوطی از مایع اشباع و بخار اشباع می باشد. برای تحلیل مناسب این مخلوط نیاز به دانستن نسبت های مایع و بخار در مخلوط داریم. این مسئله با تعریف خاصیت جدیدی به نام کیفیت ( $X$ ) که بصورت نسبت جرم بخار به کل جرم مخلوط تعریف می شود حل می گردد.

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

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

کیفیت فقط برای مخلوط های اشباع معتبر است و در نواحی بخار مافوق گرم و یا مایع تحت فشار هیچ مفهومی ندارد. و مقدار آن همیشه بین صفر تا یک می باشد. کیفیت یک سیستم که حاوی مایع اشباع است

معادل صفر بوده، و کیفیت سیستمی که حاوی بخار اشباع است برابر یک می‌باشد. در مخلوط های اشباع کیفیت می‌تواند به عنوان یکی از دو خاصیت شدتی مستقل که برای تعیین حالت نیاز است، در نظر گرفته شود. توجه داشته باشید که خواص مایع اشباع همیشه یکسان است. مایع اشباع چه تنها و چه مخلوط با بخار اشباع باشد، طی فرآیند تبخیر فقط مقدار مایع اشباع تغییر می‌کند نه خواص آن. این موضوع در مورد بخار اشباع نیز معتبر است.

### حجم کل مخلوط اشباع:

$$V = V_f + V_g$$

$$V = mV \longrightarrow m_t V_{avg} = m_f V_f + m_g V_g$$

$$m_f = m_t - m_g \longrightarrow m_t V_{avg} = (m_t - m_g) V_f + m_g V_g$$

Dividing by  $m_t$  yields

$$v_{avg} = (1 - x)v_f + xv_g$$

since  $x = m_g/m_t$ . This relation can also be expressed as

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

where  $v_{fg} = v_g - v_f$ . Solving for quality, we obtain

$$x = \frac{v_{avg} - v_f}{v_{fg}}$$

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

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

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

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

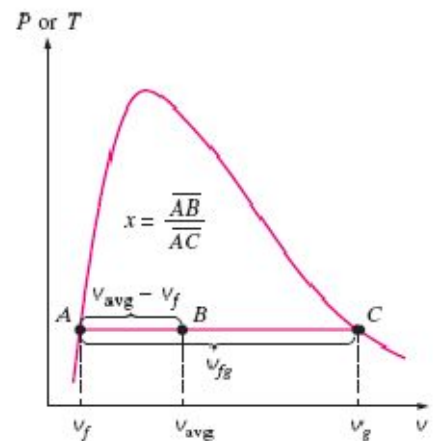


FIGURE 3-36

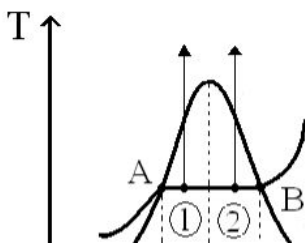
Quality is related to the horizontal distances on  $P$ - $v$  and  $T$ - $v$  diagrams.

سؤال: اگر حجمی از بخار و مایع داشته باشیم با افزایش دما چه موقع بخار به مایع و چه موقع مایع به بخار

تبدیل می‌شود؟

نکته:

$$1 \text{ در نقطه } \left\{ \begin{array}{l} v < v_{cr} \\ \text{با افزایش دما} \end{array} \right. x \downarrow m_g \downarrow \text{vapor} \Rightarrow \text{liquid}$$



$$2 \text{ در نقطه } \left\{ \begin{array}{l} v > v_{cr} \\ \text{با افزایش دما} \end{array} \right. x \uparrow m_g \uparrow \text{liquid} \Rightarrow \text{vapor}$$

پس: تغییر مخلوط اشباع به بخار مایع به حجم نقطه بحرانی و حجم مخلوط بستگی دارد. اگر حجم از حجم نقطه بحرانی کمتر بود با افزایش دما مخلوط اشباع به مایع تبدیل می‌شود و اگر حجم از حجم نقطه بحرانی بیشتر بود با افزایش دما مخلوط اشباع به گاز (بخار) تبدیل می‌شود. توجه: توجه شود که همیشه با افزایش دما بخار بدست نمی‌آید. برای توضیح بیشتر می‌توان چرخه گرم شدن آب درون یک قوطی بسته را در نظر گرفت.

$T, ^\circ\text{C}$	$v$ m <sup>3</sup> /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
⋮	⋮	⋮	⋮
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

FIGURE 3-40

A partial listing of Table A-6.

## (2) بخار فوق گرم

در قسمت راست خط بخار اشباع، ماده در حالت فوق گرم وجود دارد. از آنجائیکه ناحیه فوق گرم یک ناحیه تک فازی است (فقط شامل فاز بخار است)، دما و فشار دیگر دو خاصیت وابسته نبوده و آنها را می‌توان به عنوان دو خاصیت مستقل در جداول در نظر گرفت. صورت کلی جداول فوق گرم در شکل مقابل آورده شده است.

در این جداول، خواص بر حسب دما و به ازای فشارهای مختلف داده شده‌اند. این خواص با داده‌های بخار اشباع شروع شده‌اند. دمای اشباع بعد از مقدار اشباع، و در داخل ( ) داده شده است. بخار فوق گرم با استفاده از موارد زیر قابل تعیین است:

فشارهای کمتر از فشار اشباع ( $P < P_{sat}$  در دمای داده شده  $T$ )

دماهای بزرگتر از دمای اشباع ( $T > T_{sat}$  در یک فشار داده شده  $P$ )

حجم مخصوص های بزرگتر از حجم مخصوص اشباع ( $v < v_g$  در یک فشار  $P$  یا دمای داده شده  $T$ )

انرژی داخلی بزرگتر ( $u > u_g$  در یک فشار  $P$  یا دمای داده شده  $T$ )

آنتالپی بزرگتر ( $h > h_g$ ) در یک فشار  $P$  یا دمای داده شده ( $T$ )

### 3- مایع متراکم:

تغییرات خواص مایع تحت فشار نسبت به تغییرات فشار بسیار جزئی می باشد.

خواص مایع تحت فشار به مراتب تابع قوی تری از دما می باشد تا فشار  $y \cong y_{F@T}$

برای مایعات متراکمی که  $\gamma$  در آنها عبارت است از سه خاصیت  $v$ ،  $u$  و  $h$  خاصیتی که مقدارش بیشترین حساسیت را نسبت به فشار دارد آنتالپی است.

خواص موجود در  $h$  در فشارهای بالا را می توان به جای اینکه فقط  $hf$  را در نظر  $h \cong h_f @T + v_f (p - p_{sat})$  بگیریم با تعیین مقدار آن از به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در اینجا فشار اشباع در دمای داده شده می باشد.

به طور کلی یک مایع تحت فشار به وسیله عبارات زیر مشخص می شود:

یک مایع تحت فشار را می توان به عنوان یک مایع اشباع در همان دما در نظر گرفت.

فشارهای بالاتر از فشار اشباع ( $P > P_{sat}$  در یک دمای معین  $T$ )

دماهای پایین تر از دمای اشباع ( $T < T_{sat}$  در یک فشار معین  $P$ )

حجم مخصوص پایین تر ( $v < v_f$  در یک فشار معین  $P$  یا دمای معین  $T$ )

انرژی داخلی پایین تر ( $u < u_f$  در یک فشار معین  $P$  یا دمای معین  $T$ )

آنتالپی پایین تر ( $h < h_f$  در یک فشار معین  $P$  یا دمای معین  $T$ )

### 5-2) بررسی جدول های ترمودینامیکی و استفاده از آنها:

اولین قدم برای تعیین خواص، تعیین فاز است.

برای آب جدول های  $A-4$  و  $A-5$  برای حالت اشباع، جدول  $A-6$  برای بخار فوق گرم و جدول  $A-7$  برای مایع متراکم است.



$$\text{water} \begin{cases} A-4 \} T \\ A-5 \} P \Rightarrow \text{Saturated} \\ A-6 \Rightarrow \text{Super Heated Vapor} \\ A-7 \Rightarrow \text{Compressed Liquid} \end{cases} \leftarrow \begin{cases} \text{چون متغیرها مستقل نیستند، پس نمی توان} \\ \text{در این دو جدول از اصل حالت استفاده کرد.} \end{cases}$$

## الف) روش تشخیص فاز: (هنگامیکه دما و فشار معلوم باشند)

1- اگر فشار معلوم باشد:

$$\text{if: } P_{\text{given}} \xrightarrow{A-5} T_{\text{sat}} \begin{cases} \text{if: } T_{\text{given}} > T_{\text{sat}} \rightarrow \text{superheated vapor} \\ \text{if: } T_{\text{given}} < T_{\text{sat}} \rightarrow \text{compressed liquid} \end{cases}$$

توضیح: اگر فشار معلوم باشد به جدول A-5 می رویم، برای آن فشار را می خوانیم. اگر دمای داده شده از  $T_{\text{sat}}$  بزرگتر بود، فاز بخار فوق گرم است. اما اگر دما از کوچکتر بود فاز مایع متراکم است.

2- اگر دما معلوم باشد:

$$\text{if: } T_{\text{given}} \xrightarrow{A-4} P_{\text{sat}} \begin{cases} \text{if: } P_{\text{given}} > P_{\text{sat}} \rightarrow \text{compressed liquid} \\ \text{if: } P_{\text{given}} < P_{\text{sat}} \rightarrow \text{superheated vapor} \end{cases}$$

توضیح: اگر دما معلوم باشد به جدول A-4 می رویم.  $P_{\text{sat}}$  را برای آن دما می خوانیم، اگر فشار داده شده از  $P_{\text{sat}}$  بزرگتر بود فاز مایع متراکم است. اما اگر فشار داده شده از  $P_{\text{sat}}$  کوچکتر بود فاز بخار فوق گرم است.  
نکته: برای تشخیص فاز آب می توان از دیاگرام P-T هم استفاده کرد.

نکته : ابتدا با توجه به جداول A-4 و A-5 (برای آب) فاز را تشخیص می دهیم . سپس با توجه به جداول A-6 (برای بخار فوق گرم) و A-7 (برای مایع متراکم) بقیه خواص را بدست می آوریم .

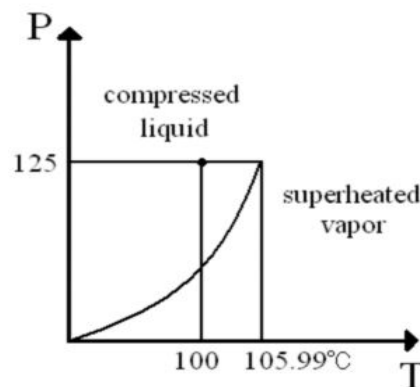
مثال:

$$\begin{cases} T_1 = 100^\circ\text{C} \\ P_1 = 125\text{KPa} \end{cases} \xrightarrow{\text{A-5}} T_{\text{sat}} = 105.99^\circ\text{C}$$

پس فاز آن مایع متراکم است .  $T_1 < T_{\text{sat}} \rightarrow \text{compressed liquid}$

حال با توجه به جدول A-7 می توان بقیه خواص را بدست آورد .

همچنین می توانستیم از دیاگرام P-T استفاده کنیم :

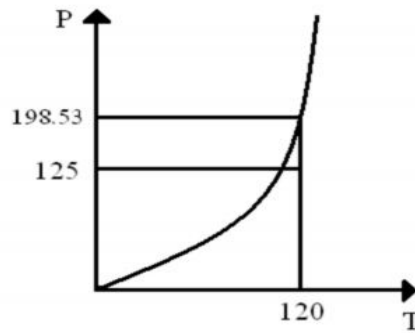


حال با توجه به جداول A-6 می توان بقیه خواص آن را بدست آورد .

توجه: برای این مثال و مثال قبلی می توانستیم از جدول A-4 هم استفاده کنیم .

$$\begin{cases} T_2 = 120^\circ\text{C} \\ P_2 = 125\text{KPa} \end{cases} \xrightarrow{\text{A-4}} P_{\text{sat}} = 198.53\text{KPa} \quad P_2 < P_{\text{sat}} \Rightarrow \text{superheated vapor}$$

$$\begin{cases} T_2 = 120^\circ\text{C} \\ P_2 = 125\text{KPa} \end{cases} \xrightarrow{\text{A-4}} P_{\text{sat}} = 198.53\text{KPa} \quad T_2 > T_{\text{sat}} \Rightarrow \text{super heated vapor}$$



(ب) روش تشخیص فاز: (هنگامی که دما و خاصیتی مثل  $y$  معلوم باشند).

(  $y = u, v, h, s, \dots$  )

$$T_{\text{given}} \xrightarrow{\text{A-4}} y_f, y_g \begin{cases} y < y_f & \text{com.liq} \\ y > y_g & \text{sup.vapor} \\ \begin{cases} y = y_f & \text{sat.liq} \\ y = y_g & \text{sat.vapor} \end{cases} \\ y_f < y < y_g & \text{sat.mix} \end{cases}$$

**توضیح:** ابتدا در جدول A-4 خاصیت های  $y_f$  و  $y_g$  را در دمای داده شده می خوانیم حال  $y$  داده شده را با آنها مقایسه می کنیم تا فاز بدست آید. پس تعیین فاز از جدولهای مربوطه بقیه خواص را بدست می آوریم.



( ج ) روش تشخیص فاز: ( هنگامی که فشار و خاصیتی مثل  $Y$  معلوم باشد).

در اینجا هم مثل قسمت (ب) عمل می کنیم با این تفاوت که در اینجا از جدول A-5 استفاده می کنیم.

( $y = u, v, h, s, \dots$ )

$$P_{\text{given}} \xrightarrow{A-5} y_f, y_g \begin{cases} y < y_f \rightarrow \text{com. liq} \\ y > y_g \rightarrow \text{sup. vapor} \\ y = y_f \rightarrow \text{sat. liq} \\ y = y_g \rightarrow \text{sat. vapor} \\ y_f < y < y_g \rightarrow \text{sat. mix} \end{cases}$$

مثال : جدول زیر را کامل کنید :

	$T^\circ\text{C}$	$P_{\text{KPa}}$	$u \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$	$x$	Phase	$h \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$
a	<b>120.23</b>	200	<b>1719.49</b>	0.6	Sat mixture	<b>1825.84</b>
b	125	<b>232.1</b>	1600	<b>0.535</b>	Sat mixture	
c	<b>395.55</b>	1000	2950		Superheat vapor	
d	75	500	<b>313.9</b>		Compressed liquid	
e	<b>172.96</b>	850	<b>731.27</b>	0.0	Sat liquid	
f	<b>172.96</b>	850	<b>2587.7</b>	1	Sat vapor	

در حالت **a**: از دو راه می توان فاز را تشخیص داد :

1- چون در این حالت کیفیت تعریف شده پس حالت اشباع است و چون  $0 < x < 1$  است پس مخلوط اشباع است . برای حل این قسمت با توجه به اینکه فشار را داریم از جدول A-5 استفاده می کنیم:

$$T_{\text{sat}} @ 200 \text{ KPa} = 120.23^\circ\text{C} \quad y = y_f + xy_{fg}$$

$$\begin{cases} u_f = 504.49 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \\ u_{fg} = 2025 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \end{cases} \Rightarrow u = u_f + xu_{fg} = 504.49 + 0.6(2025) = 1719.49 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$\begin{cases} h_f = 504.70 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \\ h_g = 2201.9 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow h = h_f + xh_{fg} = 504.70 + 0.6(2201.9) = 1825.84 \frac{Kj}{Kg}$$

**2- در حالت b:** چون دما را داده از جدول A-4 استفاده می کنیم. چون حالت اشباع است پس کیفیت معنا

دارد:

$$u_f < u < u_g \Rightarrow \text{saturated mixture مخلوط اشباع}$$

$$\xrightarrow[A-4]{T=125} \begin{cases} u_f = 524.74 \frac{Kj}{Kg} \\ u_g = 2534.5 \frac{Kj}{Kg} \end{cases}$$

$$x = \frac{y - y_f}{y_{fg}} = \frac{u - u_f}{u_{fg}} = \frac{1600 - 524.74}{2009.9} = 0.5349 \cong 0.535$$

$$P_{sat @ 125^\circ C} = 232.1 KPa$$

برای بدست آوردن h:

با توجه به جدول  $h_f$  و  $h_g$  را بدست می آوریم و در معادله قرار می دهیم تا  $h$  بدست آید.

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

توجه: در اینجا با توجه به اینکه دما را داده ابتدا با استفاده از جدول A-4 فاز را بدست آوردیم ولی چون حالت اشباع است بقیه خواص را هم از روی همین جدول بدست می آوریم و به سراغ بقیه جدول ها نمی رویم.

**در حالت c:**

چون فشار را داریم به جدول A-5 مراجعه می کنیم

$$\xrightarrow[A-5]{P=1MPa} \begin{cases} u_f = 761.68 \frac{Kj}{Kg} \\ u_g = 2583.6 \frac{Kj}{Kg} \end{cases} u > u_g \Rightarrow \text{superheated vapor بخار فشرده گرم}$$

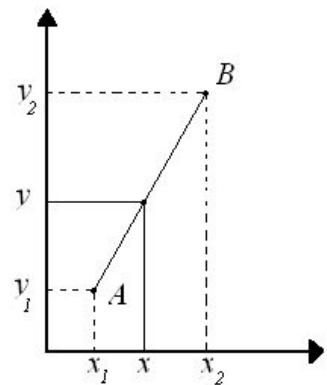
چون حالت اشباع نیست پس کیفیت معنا ندارد

پس باید از جدول A-6 استفاده کنیم:

در جدول A-6 ابتدا فشار 1MPa را پیدا می کنیم . حال با توجه به قسمت  $P=1\text{MPa}$  و  $u=2950$  را پیدا می کنیم چون این مقدار  $u$  در جدول نیست از روش میان‌یابی که در صفحه بعد توضیح داده شده است استفاده می کنیم:

روش میان‌یابی:

$1\text{MPa}$	$(T_{\text{sat}}=?)$	$u$
$T=350$		2875.2
$T=?$		2950
$T=400$		2957.3



برای حل ابتدا معادله AB را بدست می آوریم حال  $x$  را در معادله قرار می دهیم تا  $y$  بدست آید .

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \rightarrow \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \rightarrow \frac{T - 350}{400 - 350} = \frac{2950 - 2875.2}{2957.3 - 2875.2} \rightarrow T = 395.55$$

$h$  را هم به همین صورت و به روش میان‌یابی از روی جدول بدست می آوریم .

$$T_1 = 350 \quad h_1 = 3157.7 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$T = 395.53 \quad h = ?$$

$$T_2 = 400 \quad h_2 = 3263.9 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

**در حالت d:**

حالت d مایع متراکم است چون فشار از فشار اتمسفر بیشتر است پس دمای جوش آن باید از 100 بیشتر باشد در اینجا چون کمتر است پس مایع متراکم است. با توجه به داده‌ها نیز می‌توان فهمید:

$$P = 500 \text{ KPa} \xrightarrow{A-5} T_{sat} = 151.86^\circ\text{C} \quad T_{given} < T_{sat} \rightarrow \text{compressed liquid}$$

پس چون حالت اشباع نیست کیفیت معنا ندارد.

در جدول A-7 چون فشار از 5MPa شروع می‌شود، پس باید از روش زیر استفاده کرد. (در اینجا P=0.5MPa است.)

$$\begin{array}{l} \xrightarrow{A-4} \left\{ \begin{array}{l} T = 100^\circ\text{C} \\ P = 101.35 \text{ KPa} \cong 0.1 \text{ MPa} \\ v_f = 0.001044 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ u_f = 418.94 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \\ h_f = 419.04 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \\ s_f = 1.3069 \frac{\text{Kj}}{\text{kgK}} \end{array} \right. \quad \xrightarrow{A-7} \left\{ \begin{array}{l} T = 100^\circ\text{C} \\ P = 10 \text{ MPa} \\ v = 0.0010385 \\ u = 416.12 \\ h = 426.5 \\ s = 102992 \end{array} \right. \end{array}$$

$$\% \text{Error} = \frac{\left| \text{مقدار تقریبی} - \text{مقدار واقعی} \right|}{\text{مقدار واقعی}} \times 100 = \frac{|0.0010385 - 0.001044|}{0.0010385} = 0.5\% \quad \text{درصد خطا}$$

همان طور که مشاهده می‌شود درصد خطا بسیار پایین است. پس:

اگر در قسمت مایع متراکم فشار داده شده در جدول موجود نباشد (فشارهای موجود در جدول خیلی بیشتر از فشار داده شده باشند.) می‌توان خواص را از روی جدول A-4 (در حالت اشباع) در همان دمای داده شده بدست آورد چون خواص مایعات به فشار زیاد بستگی ندارند. نکته: تقریب زدن فقط برای حالت مایع متراکم است.

پس برای قسمت قبلی داریم:

$$u \approx u_f @ 75^\circ\text{C} = 313.90 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h \approx h_f @ 75^\circ\text{C} = 313.93 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

در حالت e:

چون کیفیت در آن معنا دارد پس حالت اشباع است و چون  $x=0$  است مایع اشباع  $T_{sat} = 172.96^\circ\text{C}$  است.

$$u = u_f = 731.27 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h = h_f = 732.22 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

در اینجا از جدول A-5 استفاده می‌کنیم.

جدول زیر را برای R-134a کامل کنید:

	$T^\circ\text{C}$	$P_{\text{KPa}}$	$v_{\text{m}^3/\text{kg}}$	Phase	$x$	$h$
a	-12	600	0.0007498	Compressed liquid		34.39
b	20	571.6	0.022	Sat mixture	0.606	186.946
c	2.48	320	0.0632	Saturated vapor	1	248.66
d	100	600	0.0479	Super heated		339.27

{ A-15a T  
A-15b P حالت اشباع

A-16 Superheated vapor

مبرد ها برای مایع متراکم جدول ندارند.

نکته: چون برای مایع متراکم جدول ندارد می‌توان با حالت اشباع تقریب زد.

قسمت a:

$$\begin{cases} P = 600 \text{ KPa} \approx 0.6 \text{ MPa} \\ T = -12 \end{cases} \quad T_{sat} = 21.58^\circ\text{C} \Rightarrow T_{given} = -12 < T_{sat}$$



پس مایع متراکم است و چون جدول مایع متراکم برای این ماده نداریم ، پس با دمای  $T = -12^\circ\text{C}$  در جدول A-15a تقریب می‌زنیم .

$$v \approx v_{f@-12^\circ\text{C}} = 0.0007498 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h \approx h_{f@-12^\circ\text{C}} = 34.39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

چون حالت اشباع نیست پس کیفیت معنا ندارد .

### قسمت b :

$$T = 20^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A-15a}} \begin{cases} v_f = 0.0008157 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ v_g = 0.0358 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{cases} \quad v_f < v < v_g \Rightarrow \text{saturated mixture}$$

پس در اینجا کیفیت معنا دارد . (مخلوط اشباع)

$$P_{\text{sat}@20^\circ\text{C}} = 571.6 \text{ KPa}$$

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.022 - 0.0008157}{0.0358 - 0.0008157} = 0.605$$

$$h = h_f + x h_{fg} = 77.26 + 0.605 \times 181.09 = 186.81945$$

### قسمت c :

چون بخار اشباع است پس  $x=1$  است . طبق جدول A-15b داریم:

$$T_{\text{sat}@320\text{KPa}} = 2.48^\circ\text{C}$$

$$v = v_{g@320\text{KPa}} = 0.632 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h = h_{g@320\text{KPa}} = 248.64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

در یخچال این مرحله ورودی کمپرسور است .

### قسمت d:

این قسمت مانند قسمت a حل می شود .

$P = 600\text{KPa} \rightarrow T_{sat} = 21.58^\circ\text{C}$   $T_{given} > T_{sat} \Rightarrow \text{superheated vapor}$  پس کیفیت معنا ندارد

$$\xrightarrow{A-16} v = 0.4790 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad h = 339.27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### معادله‌ی حالت<sup>۱</sup>:

هر رابطه‌ای که فشار، دما و حجم مخصوص را به هم ربط دهد، معادله‌ی حالت نامیده می شود. رسم بر این است که وقتی دمای فاز بخار یک ماده بالاتر از دمای بحرانی باشد، گاز نامیده می شود. بخار معمولاً به گازی اطلاق می شود که از حالت میعان دور نباشد.

### گاز کامل :

گازی که حجم ذراتش نسبت به حجم کل سیستم مخزن قابل صرف نظر کردن باشد.

معادله‌ی حالت گاز ایده آل (رابطه‌ی گاز ایده آل<sup>۲</sup>):

$$Pv = RT$$

**R**: ثابت گاز

$$R = \frac{R_u}{M} = \overline{R} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg.k}} \right) \left( \frac{\text{kPa.m}^3}{\text{kg.k}} \right)$$

$$R_u = MR$$

$$R_u = 8.3(4\text{kJ} / \text{kmol.k})$$

$$PV = NR_u T$$

$$p\nabla = R_u T$$

$$PV = mRT$$

$$RT \rho p = m = n . M \quad : (\nabla) \text{ حجم مخصوص مولی}$$

<sup>1</sup> . State of equation

<sup>2</sup> . For ideal gas

یعنی حجم به ازاء واحد مول (بر حسب  $m^3/kmol$ )

علامت بار (-) روی یک خاصیت نشان دهنده مقدار آن در یک مول است. در فشارهای پایین و دماهای بالا چگالی یک گاز کاهش می یابد. در چگالی های کم رفتار P-V-T مربوط به گازهای واقعی بسیار نزدیک به رابطه ی گاز ایده آل است.

در فشارهای زیر 10Kpa می توان بخار آب را صرف نظر از دمای آن با یک خطای قابل اغماض (کمتر از 1٪ درصد) یک گاز ایده آل در نظر گرفت اما در فشارهای بالاتر فرض گاز ایده آل خطاهای غیرقابل قبولی را سبب می شود. مخصوصاً در مجاورت نقطه ی بحرانی و خط بخار اشباع (بیش از 100 درصد). گازها از رفتار گاز ایده آل منحرف می شود. مخصوصاً در حالت هایی که نزدیک به ناحیه ی اشباع و یا نقطه ی بحرانی باشند.

این انحراف از رفتار گاز ایده آل در فشار و دمای معلوم را می توانیم با به کار بردن یک ضریب تصحیح به نام ضریب تراکم پذیری Z به طور دقیق در محاسبات خود به حساب بیاوریم. که Z به صورت زیر تعریف می شود:

$$V = \frac{RT}{P} \quad V = \frac{PV}{RT}$$

## ضریب تراکم پذیری<sup>1</sup>: (Z)

میزان انحراف گاز واقعی را از گاز کامل نشان می دهد:

$$Z = \frac{v_{\text{real}}}{v_{\text{Ideal}}}$$



FIGURE 3-50

The compressibility factor is unity for ideal gases.

نکته:

اگر  $Z - 1$  باشد به مفهوم گاز کامل است. وقتی  $Z \rightarrow 1$ ، گاز به گاز کامل نزدیک می شود.

برای گازهای ایده آل  $Z = 1$  می باشد.  $PV = ZRT$

برای گازهای حقیقی Z می تواند بزرگتر و کوچکتر از واحد باشد. هر چه Z از واحد، دورتر شود، انحراف گاز حقیقی از گاز ایده آل بیشتر می شود.

گازها در فشارهای پایین و دماهای بالا بسیار نزدیک به معادله ی گاز ایده آل عمل می کنند. توجه داشته باشید که کم بودن فشار و بالا بودن دما بستگی به فشار و دمای بحرانی آن ماده دارد.

<sup>1</sup>. compressibility factor

عامل Z برای همه ی گازها در دما و فشار تبدیل یکسان برابر می باشد. این موضوع اصل تطابق حالات نامیده می شود.

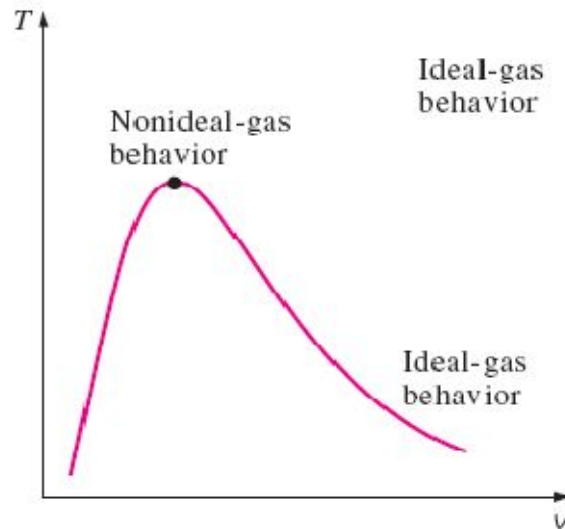
گازها به خوبی از اصل تطابق حالات پیروی می کنند. مشاهدات زیر را می توان از نمودار تراکم پذیری عمومی به دست آورد:

در فشارهای خیلی کم ( $P_R \ll 1$ ) صرف نظر از دما، گازها مانند گاز ایده آل رفتار می کنند. در دماهای بالا ( $T_R \gg 2$ ) و با صرف نظر از فشار با دقت مناسبی می توان رفتار گاز را شبیه رفتار گاز ایده آل فرض کرد (به جز وقتی که  $P_R \gg 1$ )  
نکته :

- ✓ هر چه چگالی یک گاز بیشتر باشد از گاز کامل دورتر است و هر چه چگالی کمتر باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
  - ✓ هر چه واکنش بین مولکولها کم باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
  - ✓ هر چه فاصله بین مولکولها کم باشد به گاز کامل نزدیکتر است .
  - ✓ هر چه فشار بیشتر باشد از گاز کامل دورتر است و هر چه فشار کمتر باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
  - ✓ هر چه دما بیشتر باشد فاصله مولکولها بیشتر می شود و به گاز کامل نزدیکتر است .
- دما و فشار کاهنده :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Reduce Temperature:} \Rightarrow T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad \text{دما کاهنده} \\ \text{Reduce Pressure} \quad \quad \quad \Rightarrow P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad \text{فشار کاهنده} \end{array} \right.$$

توجه :  $T_{cr}$  و  $P_{cr}$  را با توجه به جدول A-1 بدست می آوریم .  
نکته: اگر  $T_R > 2$  در نتیجه گاز می تواند کامل باشد. و اگر  $T_R < 1$  در نتیجه گاز نمی تواند کامل باشد .  
نکته: بیشترین انحراف یک گاز از رفتار گاز ایده آل در محدوده نقطه بحرانی است.

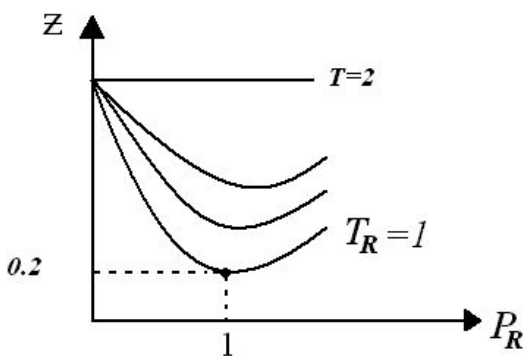


**FIGURE 3-53**

Gases deviate from the ideal-gas behavior the most in the neighborhood of the critical point.

اصل تطابق حالات :

گازها در یک  $P_R$  و  $T_R$  یکسان شبیه هم عمل میکنند .



نقطه 1 بحرانی است . چون :

$$P_R = 1 = \frac{P}{P_{cr}} \Rightarrow P = P_{cr}$$

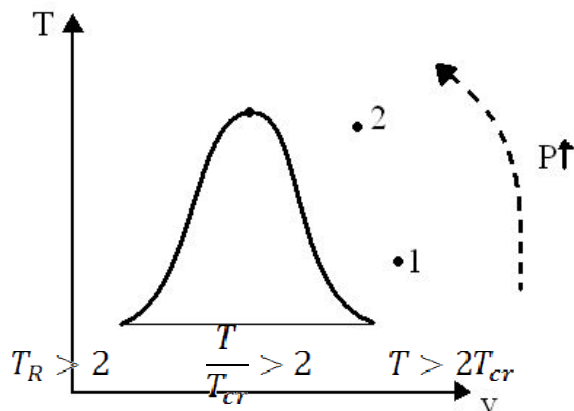
پس نقطه بحرانی است .

$$T_R = 1 = \frac{T}{T_{cr}} \Rightarrow T = T_{cr}$$

نکته : اگر  $P_R$  خیلی کمتر از یک باشد ،  $Z=1$  و گاز به گاز کامل نزدیک  $P_R \ll 1$   $Z=1 \Rightarrow$  Ideal gas می شود .

اگر  $T_R$  خیلی بیشتر از 2 باشد ،  $Z=1$  (به جز زمانی که  $P_R$  خیلی زیاد نباشد) . گاز به گاز کامل نزدیک می شود .

$$T_R \gg 2 \quad Z = 1 \quad (P \gg 1 \text{ bar}) \Rightarrow \text{Ideal gas}$$



کدام یک از دو نقطه زیر به گاز کامل نزدیکتر است؟

نقطه 1 به گاز کامل نزدیکتر است چون فشار آن خیلی کمتر از فشار نقطه 2 است.

اگر بخواهیم با دما تفسیر کنیم داریم:

یعنی برای اینکه گازی به گاز کامل نزدیک باشد باید دمای آن از دو برابر دمای نقطه بحرانی بیشتر باشد و چون هیچ یک از این دو نقطه این ویژگی را ندارند پس به سراغ فشار می‌رویم.

چون  $P_1 \ll P_2$  پس 1 به گاز کامل نزدیکتر است.

نکته: برای سنجیدن یک گاز نسبت به گاز کامل زمانی از عامل دما استفاده می‌کنیم که دما خیلی بیشتر از دمای نقطه بحرانی باشد.

توجه: درست است که دمای  $T_2$  بزرگتر از  $T_1$  است ولی چون هر دو نسبت به دمای بحرانی خیلی کمتر هستند نمی‌توان گفت کدام یک به گاز کامل نزدیکتر است.

نکته: بخار آب موجود در سیکل نیروگاه‌ها را نمی‌توان گاز کامل فرض کرد.

نکته: بخار آب موجود در یک تهویه مطبوع (یا یک اتاق) را می‌توان گاز کامل در نظر گرفت چون فشار آن کمتر از فشار هوای موجود در آن (حدوداً 1 اتمسفر) است.

1 atm = فشار  $H_2O$  + فشار  $O_2$  + فشار  $N_2$  = فشار هوا

برای آب  $P_{cr} = 220.09 \text{ bar}$

$$P_{H_2O} \ll 1 \text{ bar} \Rightarrow P_R = \frac{P_{H_2O}}{P_{cr}} \ll 1$$

نکته: هوا در دمای معمولی می‌تواند گاز کامل باشد.

نکته: فرئون‌ها در سیستم‌های تبرید (مثل یخچال، کولر گازی و ...) نمی‌توان گاز کامل در نظر گرفت.

سؤال: حجم مخصوص بخار مبرد R-134a در فشار 1MPa و دمای 50 درجه سانتیگراد با استفاده از سه روش بدست آورید؟

1- روش جدول

2- معادله گاز کامل

3- معادله گاز واقعی

همچنین درصد خطا را برای روشهای دوم و سوم بدست آورید :  
از بین این سه روش ، روش جدول دقیق ترین روش است و معادله گاز کامل بیشترین خطا را دارد .

1- روش جدول :

ابتدا فاز آن ماده را بدست می آوریم :

$$\xrightarrow{\text{table A-15}} P = 1\text{MPa} \quad T_{\text{sat}} = 39.39^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow T = 50^\circ\text{C} > T_{\text{sat}} \Rightarrow \text{super heated vapor}$$

حال به جدول بخار سوپر هیت R-134a مراجعه می کنیم:

$$\xrightarrow{\text{table A-16}} P = 1\text{MPa} \quad T = 50^\circ\text{C} \Rightarrow v = 0.02171 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$PV=RT$$

2- با استفاده از معادله گاز کامل :

حال با توجه به جدول A-1 ، R را برای R-134a بدست می آوریم :

$$\xrightarrow{\text{A-1}} R = 0.08149 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

چون اینجا kJ است پس P را هم بر حسب kPa می نویسیم :

$$T = 50^\circ\text{C} = 323\text{K} \Rightarrow v = \frac{RT}{P} = \frac{0.08149 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \times 323\text{K} \times \frac{\text{KN}\cdot\text{m}}{\text{kJ}}}{1000\text{KPa} \times \frac{1 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}{1\text{KPa}}} = 0.02632 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$PV = ZRT \quad v = Z \frac{RT}{P}$$

3- با استفاده از معادله گاز واقعی :

Z را بر اساس شکل A-30 بدست می آوریم :

$$\begin{cases} A-30a \xrightarrow{\text{بای}} 0 < Pr < 1 \\ A-30b \xrightarrow{\text{بای}} 1 < Pr < 7 \end{cases}$$

$$= \frac{|0.02171 - 0.02632|}{0.02171} \times 100 = 21.23\%$$

در شکل A-30 شکل داخلی درون این شکل برای  $0 < P_2 < 0.1$  است. پس با توجه به جدول A-1،  $P_{cr}$  و  $T_{cr}$  را بدست می آوریم:

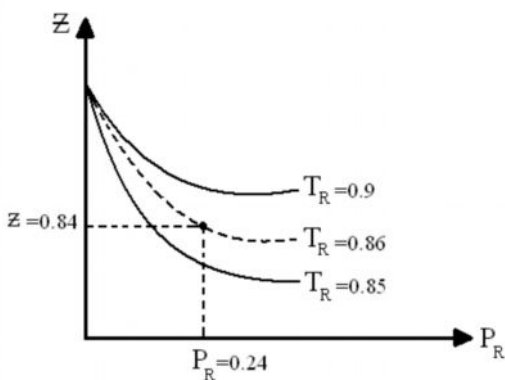
$$A-1 \begin{cases} P_{cr} = 4.06 \text{ MPa} \\ T_{cr} = 374.2 \text{ K} \end{cases} \Rightarrow P_R = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{1 \text{ MPa}}{4.06 \text{ MPa}} = 0.24$$

$$\Rightarrow T_R = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{323 \text{ K}}{374.2 \text{ K}} = 0.86$$

چون  $0 < P_R < 1$  است پس به شکل A-30a مراجعه می کنیم:  
حال از خطی که  $T_R$  آن برابر 0.86 است استفاده می کنیم.

چون نموداری که  $T_R$  آن برابر 0.86 باشد نداریم و  $T_R = 0.85$  را داریم. خط  $T_R = 0.86$  را به طور فرضی کمی بالاتر از 0.85 رسم می کنیم.

حال  $P_R = 0.24$  را بدست می آوریم و آن را بالا می بریم تا به خط فرضی رسم شده برسیم و از آن به محور  $z$  عمود می کنیم تا  $z$  مشخص شود، پس:



$$z = 0.84$$

$$v = z \frac{RT}{P} = 0.84 \times 0.02632 = 0.02211 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{درصد خطا} = \frac{|0.02171 - 0.02211|}{0.02171} \times 100 = 1.8\%$$

