

# BAB

# II

## WATAK ZAT MURNI

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai konsep bahan murni dan bermacam-macam fase termasuk fisika proses perubahan yang disebabkan. Semisal diagram sifat dan P,v,t surfaces merupakan gambaran dari bahan murni. Penggunaan sifat bahan akan diterangkan dan hipotesis bahan "gas ideal" dan gas ideal sama dengan bentuk yang menyebabkannya. faktor kompresibilitas, dimana jumlah nyata dari pelakuan gas ideal akan diperkenalkan dan juga digambarkan

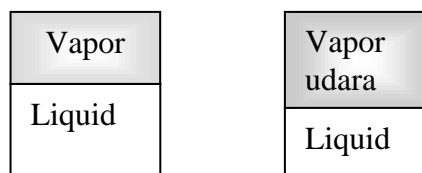
### A. Zat Murni

Suatu bahan yang komposisinya terdiri dari susunan kimiayang tetap disebut dengan bahan murni. Air, helium dan carbon dioxide adalah contoh dari seluruh bahan murni.

Sebuah bahan murni tidak mungkin terdiri dari unsur tunggal atau tanpa komposisi. Campuran dari dua atau lebih fase dari bahan murni masih disebut sebagai bahan murni apabila campuran tersebut homogen. Sebagai contoh pencampuran uap air dengan nitrogen dapat dikatakan sebagai bahan murni. Sedangkan pencampuran minyak dengan air tidak dapat menyatukan air dan minyak. Minyak dan air tidak dapat menyatukan air dan minyak. Minyak dan air selalu berada diatas air.



Gambar 22. Nitrogen dan udara merupakan zat murni



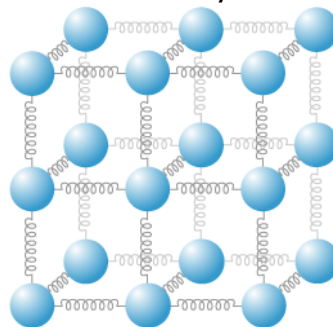
Gambar 23. Campuran cairan dan uap air adalah zat murni, tetapi campuran cairan dengan uap air bukan zat murni

## B. Bentuk dari Zat Murni

Kita semua mengetahui bahwa percobaan terhadap satu zat dapat menyebabkan perubahan lemah. Pada suhu ruang dan tekanan normal, tembaga dalam bentuk padat, mercury dalam bentuk cair dan nitrogen dalam bentuk gas. Pada kondisi yang berbeda, mungkin dapat terlihat bentuk yang berbeda. Terdapat 3 prinsip bentuk dari zat yaitu padat, cair dan gas, setiap zat dalam setiap bentuknya memiliki struktur molekul yang berbeda. Sebagai contoh adalah karbon, pada keadaan padat merupakan benda padat yang memiliki fase.

Ketika belajar perubahan fase pada termodinamika, tidak diperlukan pengetahuan struktur molekul tiap fase yang berbeda secara detail. Meskipun begitu, akan sangat membantu jika mengetahui fenomena molekul tiap fase dan transformasi tiap fase.

Bentuk molekul yang memiliki ikatan yang sangat padat dan yang memiliki kerapatan yang rendah berupa gas. Reaksi tersebut menyebabkan molekul yang berbentuk padat berupa sepaket, dan molekul yang berbentuk gas tersebar menyeluruh.

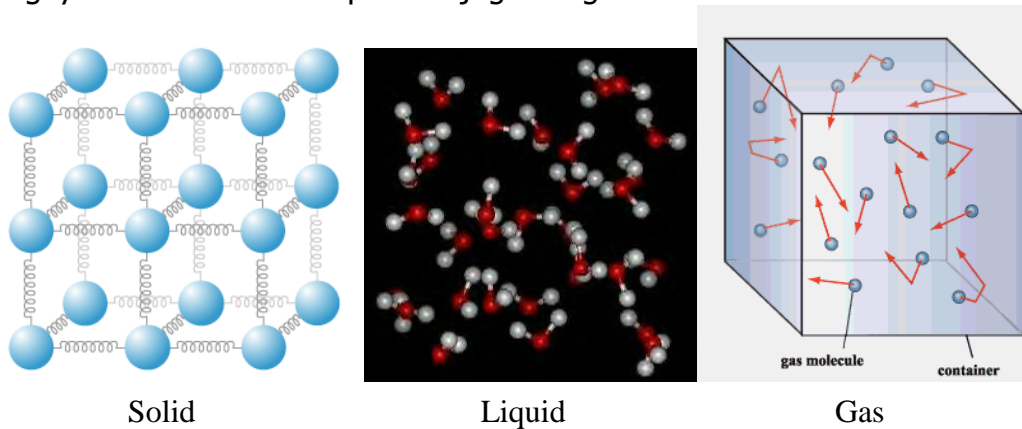


Gambar 24. Molekul pada benda padat

Molekul pada benda padat disusun secara tiga dimensi dimana didalamnya terdapat ikatan yang kuat antar molekul sehingga menjaga molekul tetap terjaga pada posisinya. Dengan demikian molekul zat padat dipindahkan. Mereka secara terus-menerus mengisolasi keseimbangan. Kecepatan dari molekul dalam melakukan isolasi tergantung pada temperatur. Pada temperatur yang tinggi, kecepatan (momentum) dari molekul meningkat dan memungkinkan gaya yang ada dapat memisahkan partikel dan kelompok molekul. Hal ini biasa dilakukan didalam proses peleburan.

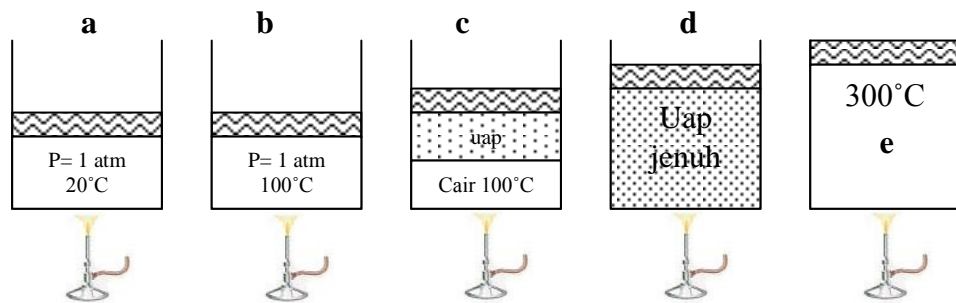
Pada fase gas molekul terdiri dari partikel yang jaraknya jauh antara satu dengan yang lain dan molekul berada pada kondisi tidak tetap. Molekul gas akan mengisi seluruh keadaan yang ada dalam

wadah gas itu berada. Rapat massa dari partikel ini sangat rendah dan gaya merevolusi antar partikel juga sangat kecil.



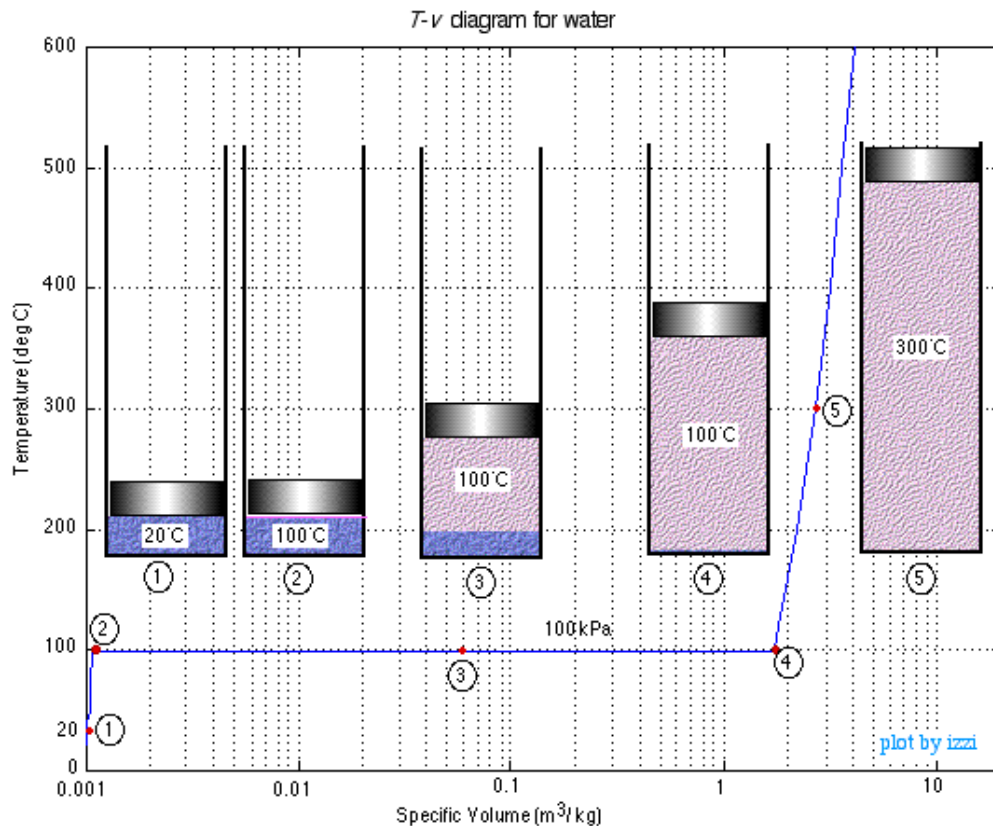
Gambar 25. Susunan atom pada fase yang berbeda.

Pada tekanan 1 atm dan suhu 20°C air berada pada fase cair, pada fase ini disebut dengan *compressed liquid (subcooled liquid)*. Pada keadaan tidak ada air yang menguap. Pada suhu naik hingga 100°C air masih dalam wujud cair tetapi hampir menguap, tahapan ini terjadi perubahan fase yang disebut *saturated liquid*. Pada saat panas terus ditambah maka sebagian cairan jenuh akan menguap. Hal ini disebut *saturated liquid-vapor mixture*. Pada tekanan 1 atm, suhu tetap 100°C sampai tetesan terakhir cairan menguap disebut dengan *saturated vapor*. Ketika panas terus ditambah maka suhu uap air akan terus naik dan fase ini disebut dengan *superheated vapor*.



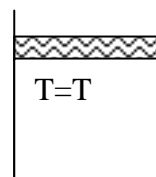
Gambar 26. a. *Compressed Liquid*, b. *Saturated Liquid*, c. *Saturated Liquid-Vapor Mixture*, d. *Saturated Vapor*, e. *Superheated Vapor*

Perubahan fase tersebut dapat dilukiskan dengan diagram T-V



Gambar 27. Fase Pada Air

Suhu saturasi dan tekanan saturasi adalah suhu dimana air mulai mendidih tergantung pada tekanan, sehingga bila tekanan tertentu maka suhu didih tersebut juga tertentu.

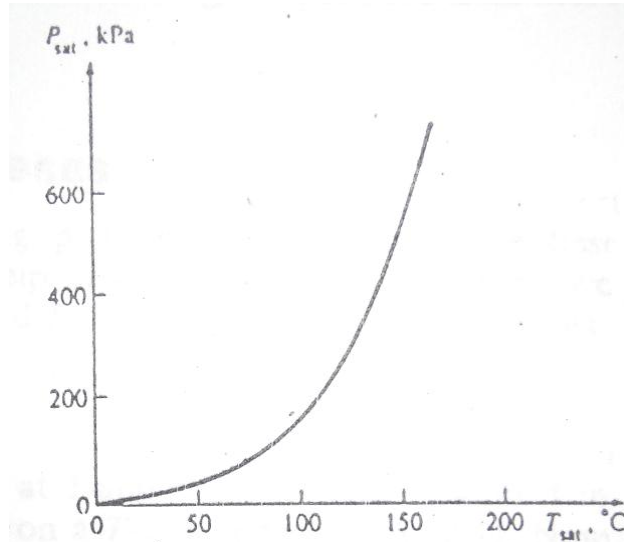


Gambar 28. Pada Tekanan Tertentu Zat Murni Mendidih Pada Suatu Suhu Tertentu (*Saturated* Temperatur)

Pada tekanan 1 atm (101,35Kpa) air mulai mendidih pada 100°C bila tekanan dinaikkan 200 kPa (misal ditambah beban pada piston) maka air akan mendidih pada suhu 151,9°C, sehingga dapat disimpulkan bahwa suhu saturasi adalah suhu zat murni mulai mendidih sedangkan tekanan saturasi adalah tekanan dimana zat murni mulai mendidih. Dalam hal ini tekanan 101,3 kPa →  $T_{\text{sat}}=100^{\circ}\text{C}$  dan pada suhu 100°C,  $P_{\text{sat}} = 101,35 \text{ kPa}$ .

Selama proses perubahan fase tekanan dan suhu tergantung properties sesuai relasi  $T_{\text{sat}} = f(P_{\text{sat}})$ . Dari persamaan tersebut

akan menghasilkan grafik  $T_{sat}$  dan  $P_{sat}$  yang menunjukkan *liquid-vapor saturation curve*

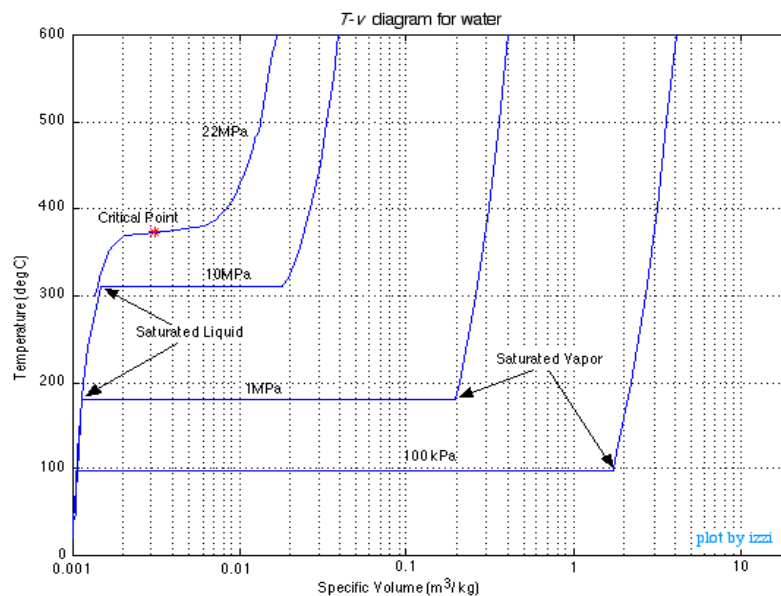


Gambar 29. Kurva *Liquid-Vapor Saturation*

Contoh pemakaian adalah memasak daging pada panci biasa dengan tekanan 1 atm akan berhasil matang dalam waktu 1 sampai 2 jam. Namun bila tekanan tersebut ditingkatkan 2 atm. Daging akan matang dalam panci tekanan selama 20 sampai 30 menit.

Terdapat beberapa diagram properti untuk proses perubahan fase diagram tersebut meliputi :

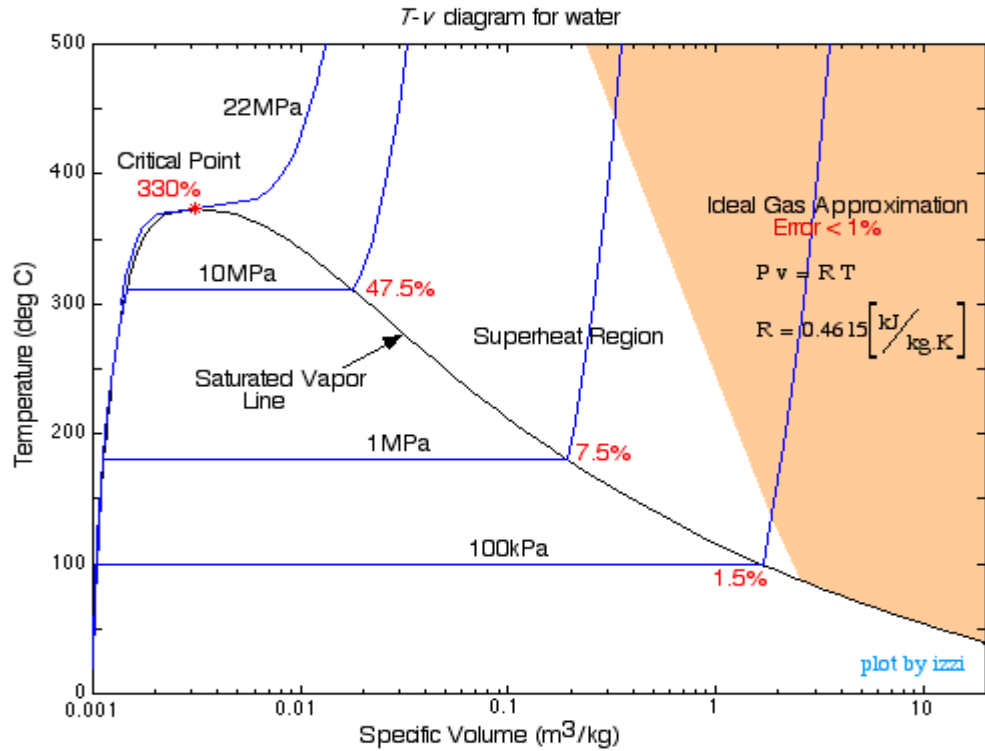
1. Diagram  $T-v$  (pada  $P$  tertentu)



Gambar 30. Diagram  $T-v$  untuk air

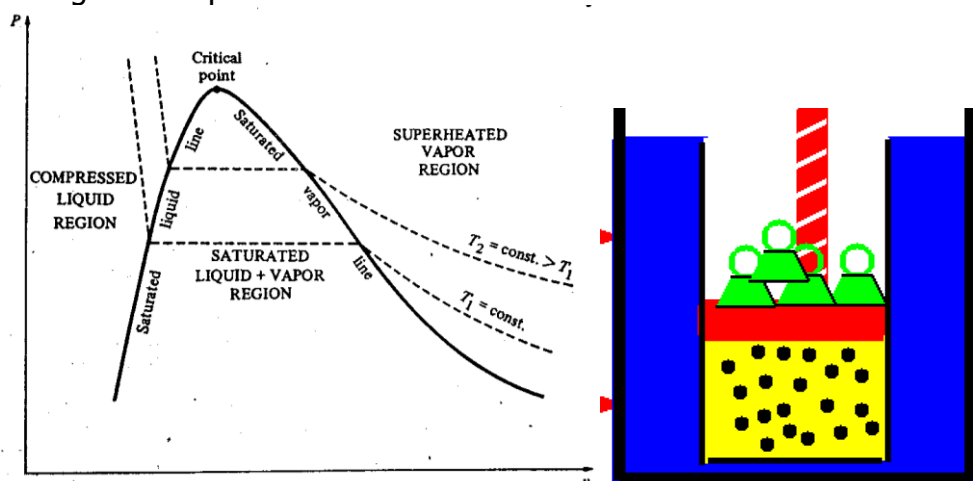
*Critical point* adalah titik dimana cairan jenuh (*saturated liquid*) dan uap jenuh (*saturated vapor*) sama keadaannya.

Suhu kritik =  $T_{cr} = 374,14^{\circ}\text{C}$   
 Tekanan kritik =  $P_{cr} = 22,09 \text{ Mpa}$   
 Volume Spesifik Kritik =  $V_{cr} = 0,003155 \text{ m}^3/\text{kg}$   
 Nilai diatas adalah untuk air, sedangkan untuk Helium adalah  $0,23 \text{ Mpa}$ ,  $-267,85^{\circ}\text{C}$ , dan  $0,001444 \text{ m}^3/\text{kg}$



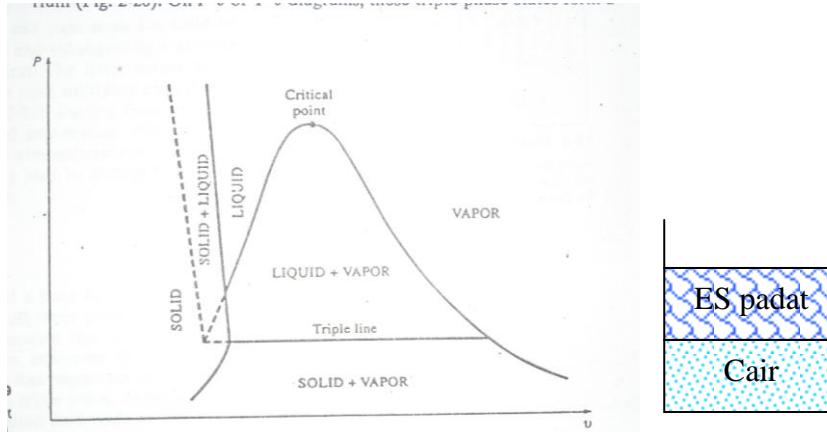
Gambar 31. Diagram  $T-v$  dari zat murni

2. Diagram  $P-v$  pada  $T$  tertentu

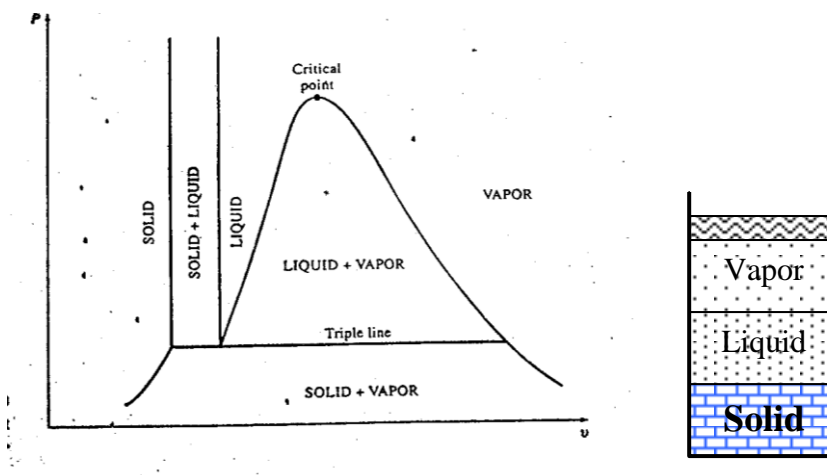


Gambar 32. Diagram  $P-v$

Diagram P-v diatas dapat dikembangkan dengan melibatkan fase padat (*solid phase*), sehingga dapat dilihat seperti gambar dibawah ini



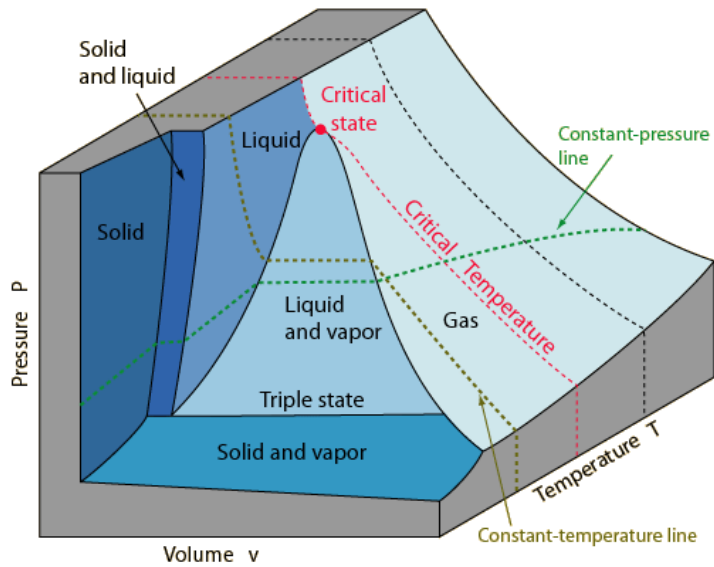
Gambar 33. P-v Diagram *Contract* pada pembekuan



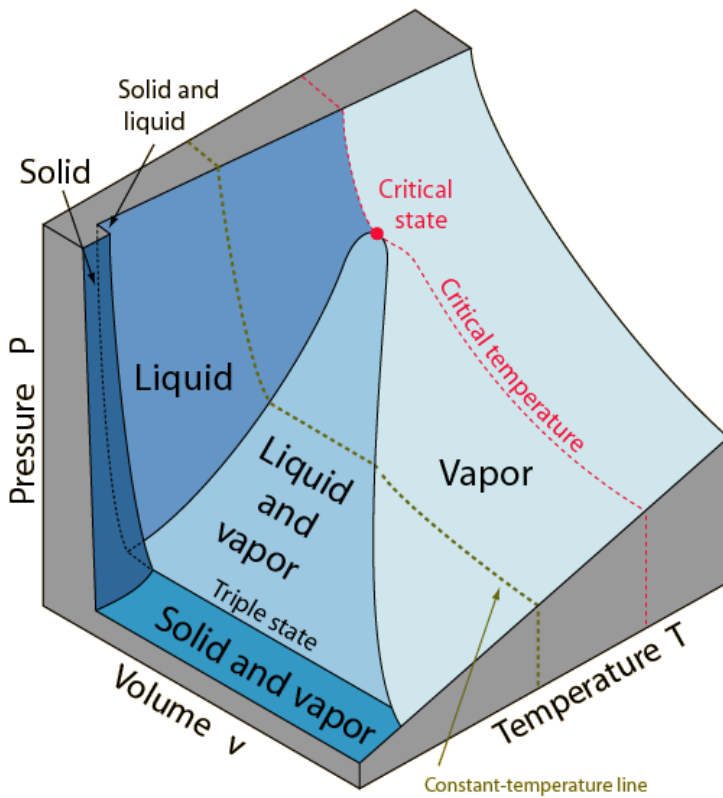
Gambar 34. Diagram P-v *expands* pada pembekuan

### 3. P-v-T Surface

Adalah penggabungan 2 diagram 2 dimensi dari hubungan P,V,T sehingga menjadi grafik 3 dimensi. Diagram P-v hanya memproyeksikan P-v-T pada bagian P-v dan diagram T-v merupakan sudut pandang penglihatan pada permukaan ini. P-v-T surface dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dibandingkan penggunaan diagram P-v dan T-v yang dua dimensi.



Gambar 35. P- $v$ -T surface pada *contract Freezing*



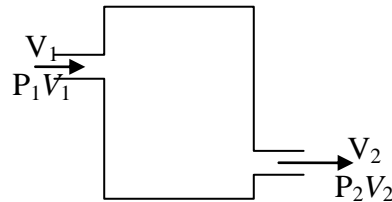
Gambar 36. P- $v$ -T surface pada *expands freezing*

### C. Tabel Property

Kebanyakan zat hubungan antara property termodinamik sangat rumit untuk ditunjukkan oleh persamaan. Namun, beberapa property dapat diukur dengan mudah dan selain itu dapat dihitung dan



hasilnya adalah tabel. Salah satu tabel tersebut adalah kombinasi ***Enthalpy property***



Gambar 37. Kombinasi  $V + P v$

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

$$\text{Enthalpy per unit massa} = h = u + p v \text{ (kJ/kg)}$$

### 1. Saturated Liquid dan Saturated Vapor

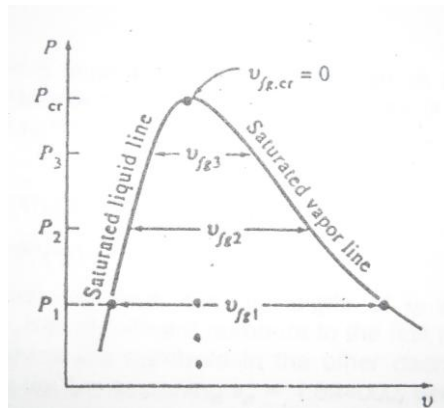
Adalah keadaan cairan jenuh (sat-liq) dan uap jenuh (sat-vap) disusun dalam tabel keduanya dibedakan dibawah satu suhu atau dibawah tekanan (tabel suhu atau tabel tekanan). Bila data berupa tabel suhu gunakan tabel suhu. Bila data berupa tekanan digunakan tabel tekanan.

Contoh tabel suhu (*saturated water*)

Temp °C T	Sat Press kPa $P_{\text{sat}}$	Spesifik Volume	
		Sat Liq $V_f$	Sat Vapor $V_g$
85	57.83	0.001033	2.828
90 →	70.14 →	0.001036 →	2.361 →
96	84.55	0.001040	1.982

Contoh tabel tekanan pada (*saturated water*)

Temp °C T	Sat Press kPa $P_{\text{sat}}$	Spesifik Volume	
		Sat Liq $V_f$	Sat Vapor $V_g$
40	75.87	0.001027	3.993
50	81.33	0.001030	3.240
75 →	91.78 →	0.001037 →	2.217 →



Gambar 38.  $V_{fg}$  bertambah dalam P atau T meningkat dan bernilai nol pada *Critical Point*

$V_f$  = *Specific volume of saturated liquid*

$V_g$  = *Specific volume of saturated Vapor*

$V_{fg}$  = *Different between  $V_g$  and  $V_f$*

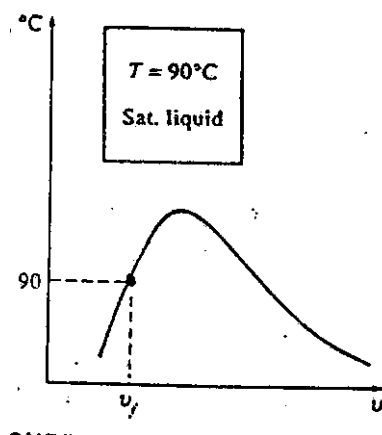
=  $V_g - V_f$  = *specific volume pada penguapan*

$h_{fg}$  = *Enthalpi penguapan (panas laten penguapan)*

Contoh 1:

Sebuah tangki berisi 50 kg air (dalam bentuk cairan jenuh/saturated liquid) pada suhu  $90^\circ\text{C}$ . Hitunglah tekanan dalam tangki dan volume tangkinya?

Jawab



Keadaan cair sat-liq ditunjukkan pada diagram karena kondisi saturasi ada dalam tangki, maka tekanan harus tekanan saturasi pada  $90^\circ\text{C}$

Berdasarkan tabel A-4

$$P = P_{\text{sat pada } 90^\circ\text{C}} = 70,14 \text{ kPa}$$

Volume Spesifik cairan jenuh pada  $90^\circ\text{C}$

$$V = V_f \text{ pada } 90^\circ\text{C} = 0,001036 \text{ M}^3/\text{kg}$$

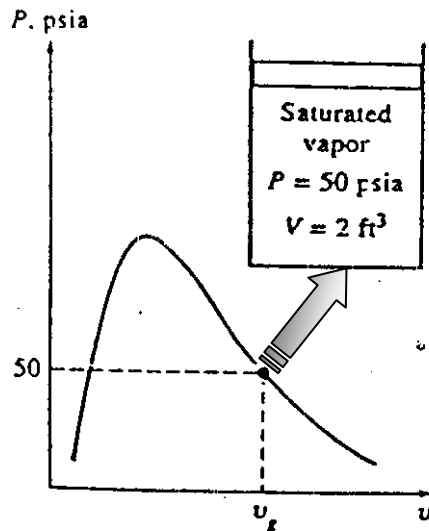
Volume total tangki

$$V = m \cdot v = (50)(0,001036) = 0,0918 \text{ m}^3$$

Contoh 2:

Sebuah alat silinder piston berisi 2 Ft<sup>3</sup> uap air jenuh (saturated water vapor) pada tekanan 50 Psia. Hitunglah suhu uap dan massa uap dalam silinder!

Jawab



Keadaan uap air jenuh ditunjukkan dalam diagram P-v karena silinder tersebut berisi uap jenuh pada 50 Psia, maka temperatur dalam silinder harus temperatur saturasi pada tekanan tersebut.

FIGURE 2-11

Berdasarkan tabel (A-5E)

$$T = T_{\text{sat pada 50 psia}} = 281,03 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Volume Spesifik uap jenuh pada 50 Psia

$$V = V_g \text{ pada 50 psia} = 8,518 \text{ Ft}^3/\text{lbm}$$

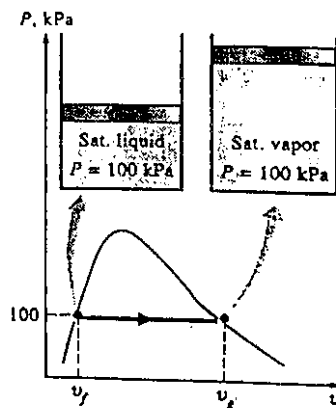
Massa uap air di dalam silinder

$$M = \frac{v}{m} = \frac{2 \text{ Ft}^3}{8,518 \text{ Ft}^3 / \text{lbm}} = 0,2,35 \text{ lbm}$$

Contoh 3:

Air dalam bentuk cairan jenuh bermassa 200gr diuapkan seluruhnya pada tekanan 100 kPa. Hitunglah (a) perubahan volume; (b) Jumlah energi yang diberikan ke air!

Jawab



- a. Proses tersebut diatas digambarkan pada diagram P-v. perubahan volume persatuan massa selama penguapan =

$$V_{fg}$$

H = Enthalpy

= e. kalor

berdasarkan tabel A-9 pada 100 kPa

$$V_{fg} = V_g - V_f = (1,6940 - 0,001043) \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$= 1,6930 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\Delta V = m \cdot V_{fg} = (0,2 \text{ kg})(1,6930 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$= 0,3386 \text{ m}^3$$

- b. Energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut → enthalpy penguapan pada 100 kPa yaitu

$$h_{fg} = 2258 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{fg} = m \cdot h_{fg} = (0,2)(2258 \text{ kJ/kg})$$

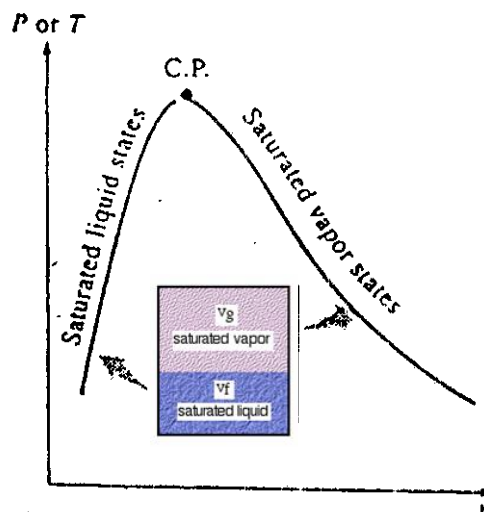
$$= 451,6 \text{ kJ}$$

## 2. Campuran Uap-cairan jenuh

Selama proses penguapan, zat berupa sebagian cair dan sebagian gas, kondisi tersebut adalah saturated vapor. Untuk menganalisis campuran tersebut perlu diketahui proporsi fase cair dan uap dalam campuran tersebut. Hal ini dilakukan dengan menentukan suatu properti baru → kualitas x yaitu rasio massa uap terhadap massa.

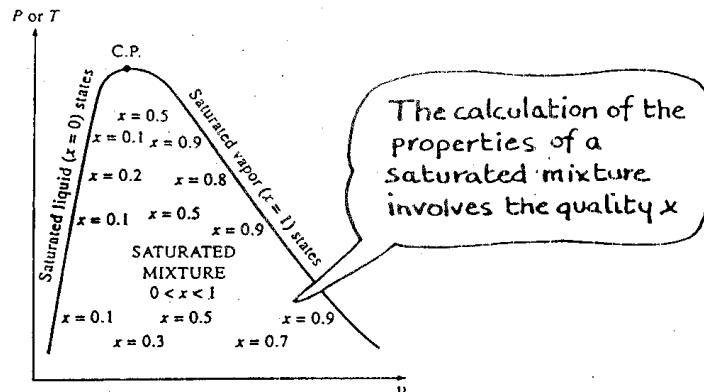
Totalnya:

$$X = \frac{m_{\text{uap}}}{m_{\text{total}}} = \frac{m_g}{m_t}$$



Gambar 40. Jumlah relatif pada fase liquid dan vapor pada saturated mixture dengan dispesifikasikan oleh quality x

Kualitas hanya terdapat pada campuran jenuh, dan tidak bermakna dalam daerah compressed liquid atau superheated vapor. Kualitas  $x$  besarnya selalu diantara 0 dan 1. kualitas suatu sistem yang terdiri dari saturated liquid adalah 0 (0%) dan kualitas suatu sistem yang terdiri dari saturated vapor adalah 1 (100%).



Gambar 41. Quality bernilai antara 0 dan 1

Campuran jenuh dapat diperlakukan sebagai kombinasi dari dua sub sistem, yaitu sat-liq dan sat vapor. Meskipun jumlah massa tiap fase biasanya tidak diketahui.

Lebih mudah membayangkan 2 fase tersebut tercampur baik dengan penampilan homogen. Property "campuran" secara sederhana menjadi properti rata-rata (average property) campuran keduanya.

Bila volume *sat-liq* =  $v_f$  dan

Volume *sat-uap* =  $V_g$

Maka volume total

$$V = V_f + V_g \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V = m \cdot v \rightarrow m_t \cdot V_{av} = m_f \cdot V_f + m_g \cdot V_g \rightarrow V \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

$$M_f = m_t - m_g \rightarrow m_t V_{av} = (m_t - m_g) V_f + m_g \cdot V_g$$

Dibagi dengan  $m_t$ :

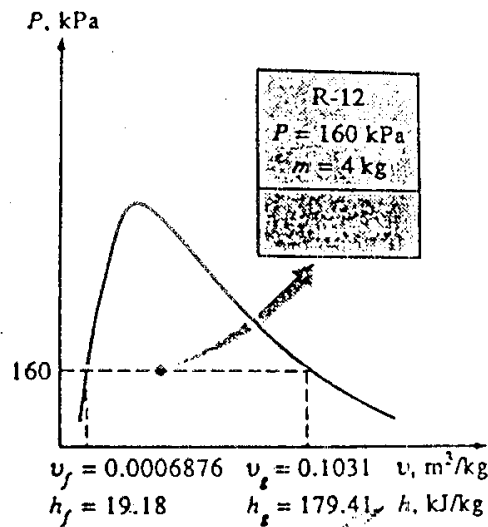
$$V_{av} = (1 - v) V_f + x V_g$$

Karena  $x = \frac{m_g}{m_t}$  dan  $V_{fg} = V_g - V_f$ , maka

$$\rightarrow V_{av} = V_f + x V_{fg} \rightarrow v = V_f + V_{fg}$$

$$x = \frac{V_{av} - V_f}{V_{fg}}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, kualitas  $x$  dapat digambarkan pada diagram P-V atau T-V



Gambar 42. Quality dinyatakan dalam jarak horisontal

Analisis diatas dapat berlaku bagi property tenaga dakhil (v) da entalpi (h)

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

$$h_{av} = h_f + ch_{fg} \text{ (kJ/kg)}$$

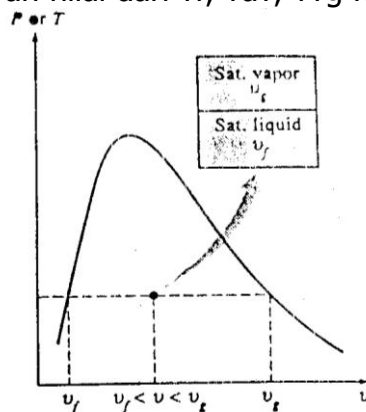
secara umum dapat dijabarkan sebagai berikut

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

y adalah v, u, atau h

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

Dimana  $v_{av}$  terdapat pad soal, sedangkan  $v_f, v_g$  dapat dilihat pada tabel. Dan nilai dari  $v_f, v_{av}, v_g$  harus  $v_f < v_{av} < v_g$



Gambar 43. Nilai u dari saturated liquid-vapor mixture antara  $v_f$  dan  $v_g$  pada T atau P spesifik

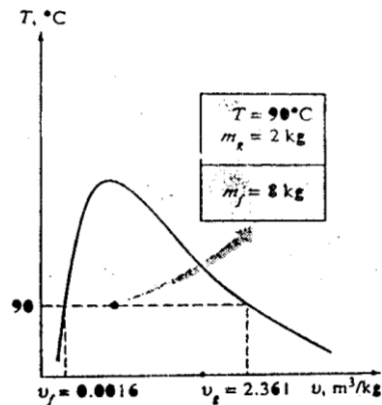
Contoh 1:

Sebuah tangki berisi 10Kg air pada suhu  $90^\circ\text{C}$ . Bila air tersebut 8Kg berbentuk cair dan sisanya berbentuk uap

Tentukan : a. Tekanan dalam Tangki , b. Volume tangki

Jawab:

- a. Keadaan campuran uap-cairan jenuh digambarkan seperti berikut:



karena 2 fase diatas dalam keseimbangan, maka terdapat campuran jenuh dan tekanan adalah saturasi pada suhu yang ada yaitu:

$$P = P_{\text{sat pada } 90^{\circ}\text{C}} = 70,14 \text{ kPa (Tab A-4)}$$

- b. Pada  $90^{\circ}\text{C}$ ,  $V_f$  dan  $V_g$  diperoleh:

$$V_f = 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_g = 2,361 \text{ m}^3/\text{kg (tabel A-4)}$$

Satu cara untuk menentukan volume tangki adalah menentukan volume masing-masing fase dan menjumlahkannya

$$V = V_f + V_g = m_f \cdot v_f + m_g \cdot v_g$$

$$= (8\text{kg})(0,001\text{m}^3/\text{kg}) + (2\text{kg})(2,361\text{m}^3/\text{kg})$$

cara lain, dengan menentukan  $x$  dan selanjutnya volume spesifik rata-rata dan akhirnya volume total:

$$x = \frac{M_g}{M_f} = \frac{2\text{kg}}{10\text{kg}} = 0,2$$

$$V = V_f + V_t$$

$$= 0,001\text{m}^3/\text{kg} + (0,2)((2,361 - 0,001)\text{m}^3/\text{kg}) = 0,473 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V = m \cdot v = (10\text{kg})(0,473 \text{ m}^3/\text{kg}) = 4,73 \text{ m}^3$$

Cara nampak lebih mudah daripada cara pertama karena massa masing-masing fase diketahui. Kebanyakan massa tiap fase tidak diperoleh sehingga cara kedua lebih sesuai.

Contoh 2:

Sebuah tabung 80 liter berisi 4 kg zat pendingin Refrigerant R-12 pada tekanan 160 kPa

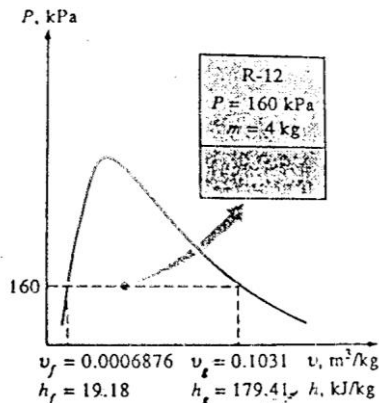
Tentukan:

- Suhu Refrigerant
- Kualitas kadar uap
- Entalpi refrigerant

d. Volume Fase Uap

JawabL:

- a. Keadaan saturated liquid mixture digambarkan dalam diagram P-V atau P-h



dalam hal ini tidak diketahui apakah refrigerant termasuk kategori *compressed liquid*, saturated vapor atau superheated vapor. Atau saturated mixture.

Berdasarkan data yang ada, volume spesifik :

$$V = \frac{V}{m} = \frac{0,080m^3}{4kg} = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Pada tekanan 160 kPa

$$V_f = 0,00068m^3/kg$$

$$V_g = 0,1031 \text{ m}^3/\text{kg} \text{-----} \rightarrow \text{Tabel A-12}$$

Karena  $V_f < v < V_g$  maka refrigerant tersebut dalam keadaan daerah saturated mixture.

$$T = T_{\text{sat}} @ 160 \text{ kPa} = -18,49^\circ\text{C}$$

- b. Kualitas kadar uap dihitung dengan

$$X = \frac{V - V_f}{V_{fg}} = \frac{0,02 - 0,0007}{0,1031 - 0,0007} = 0,188$$

- c. Pada tabel property diatas juga dapat dibaca untuk  $h_f = 19,18$  kJ/kg) dan  $h_{fg} = 160,23$  kJ/kg, maka entalpi:

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

$$= 19,18 \text{ kJ/Kg} + (0,188)(160,23 \text{ kJ/kg})$$

$$= 49,3 \text{ kJ/kg}$$

- d. Massa uap dihitung dengan

$$M_g = x \cdot m_t = (0,188)(4\text{kg}) = 0,753 \text{ kg}$$

Volume uapnya

$$V_g = m_g \cdot V_g = (0,752\text{kg})(0,103 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$= 0,0775 \text{ m}^3$$

$$= 77,5 \text{ liter}$$

$$V_f = \text{volume cairan} = 80 - 77,5 = 2,5 \text{ liter}$$



### 3. Superheated vapor (uap panas lanjut)

Didaerah sebelah kanan garis uap jenuh, suatu zat berupa sebagai uap panas lanjut. Karena daerah panas lanjut merupakan daerah fase tunggal (hanya fase uap), maka suhu dan tekanan bukan properti yang salingbergantung, dan suhu serta tekanan tersebut, sebagai dua property yang tidak salaing bergantung.

Bentuk tabel uap panas lanjut sebagai berikut:

$T, ^\circ\text{C}$	$v,$ $\text{m}^3/\text{kg}$	$u,$ $\text{kJ/kg}$	$h,$ $\text{kJ/kg}$
$P = 0.1 \text{ MPa (} 99.63^\circ\text{C)}$			
Sat.	1.6940	2506.1	2675.5
100	1.6958	2505.7	2676.2
150	1.9364	2582.8	2776.4
1300	7.260	4683.5	5409.5
$P = 0.5 \text{ MPa (} 151.86^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7
200	0.4249	2642.9	2855.4
250	0.4744	2723.5	2960.7

Gambar 44. Potongan Tabel A-6

Uap panas lanjut ditandai oleh beberapa keadaan diantaranya adalah tekanan lebih rendah ( $P < P_{\text{sat}}$  pada suatu  $T$  yang ada), suhu lebih tinggi ( $T > T_{\text{sat}}$  pada suatu  $P$  yang ada), Volume spesifik lebih tinggi ( $v > v_g$  pada suatu  $P$  yang ada), Energi dakhil lebih tinggi ( $u > u_g$  pada  $T$  atau  $P$  yang ada), Entalpi lebih tinggi ( $h > h_g$  pada  $T$  atau  $P$  yang ada).

Contoh 1:

Hitunglah energi dakhil air pada tekanan 20 psia dan suhu  $400^\circ\text{F}$

Jawab:]

Pada tekanan 20 psia suhu saturasinya  $227,96^\circ\text{F}$  kerana suhu yang ada lebih besar daripada suhu saturasi ( $T > T_{\text{sat}}$ ) air tersebut dalam keadaan uap panas lanjut.

Energi dakhilnya ditentukan dari tabel uap panas lanjut (tabel A-6E)

$$U = 1145,1 \text{ Btu/lbm}$$

Pada suhu dan tekanan yang diberikan

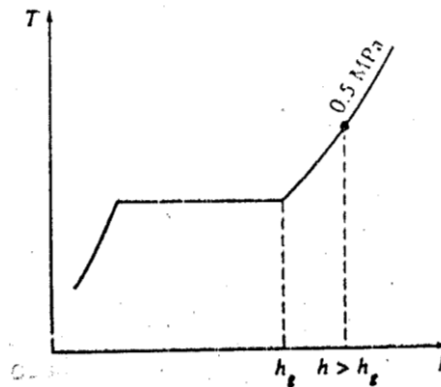
Contoh 2:

Tentukan suhu air pada suatu keadaan  $P=0,5 \text{ Mpa}$  dan  $h = 2890 \text{ kJ/kg}$

Jawab:

Pada  $0,5 \text{ Mpa}$ , entalpi uap air jenuh  $h_g = 2748,7 \text{ kJ.kg}$

Karena  $h < h_g$  (seperti gambar dibawah) uapnya  $\rightarrow$  uap panas lanjut. Menurut tabel A-6  $T, ^\circ\text{C}$  200;  $h, \text{kJ/kg}$  2855,4;  $T, ^\circ\text{C}$  250  $h, \text{kJ/kg}$  2960,7



dengan interpolasi untuk  $h=2890 \text{ kJ/kg}$  suhunya di antara 200 dan  $250^\circ\text{C}$ , yaitu  $T=216,4^\circ\text{C}$

#### 4. Compressed Liquid

Dalam literatur tidak banyak data untuk compressed liquid, dan tabel A-7 satu-satunya tabel compressed liquid pada uraian ini. Bentuk tabel A-7 sangat mirip dengan tabel uap panas lanjut. Salah satu alasan langkanya data compressed liquid adalah properti compressed liquid tidak terikat oleh tekanan. Variasi properti dari compressed liquid terhadap tekanan sangat halus. Perubahan/kenaikan tekanan 100 kali seringkali hanya merubah properti kurang dari satu persen. Properti yang banyak terpengaruh tekanan adalah entalpi.

Pada data compressed liquid perkiraannya adalah: memperlakukan compressed liquid sebagai saturated liquid pada suhu yang diberikan. Hal tersebut disebabkan properti compressed liquid tergantung pada suhu lebih kuat daripada terhadap tekanan sehingga:

$$Y \cong Y_{f@T}$$

Y adalah  $v, u,$  atau  $h.$

Diketahui  $P=T$

$$V \cong v_{f@T}$$

$$u \cong u_{f@T}$$

$$h \cong h_{f@T}$$

*Compressed liquid* ditandai dengan tekanan lebih tinggi ( $P > P_{\text{sat}}$  pada  $T$  yang ada); suhu lebih rendah ( $T < T_{\text{sat}}$  pada  $P$  yang ada); volume spesifik lebih rendah ( $v < v_f$  pada  $P$  atau  $T$  yang ada); Entalpi lebih rendah ( $h < h_f$  pada  $P$  atau  $T$  yang ada)

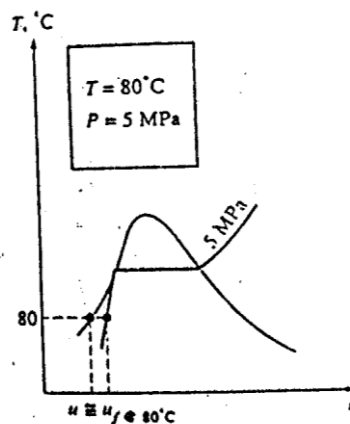
Contoh 1:

Hitunglah energi dakhil dari air berbentuk compressed liquid pada suhu  $80^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 5Mpa, dengan menggunakan:

- data dari tabel compressed liquid
  - data saturated liquid
- berapa ralat (error) dalam asus kedua.

Jawab:

Pada  $80^{\circ}\text{C}$  tekanan saturasi ( $P_{\text{sat}}$ ) air adalah 47,39 kPa, dan karena  $5 \text{ Mpa} > P_{\text{sat}}$  maka air tersebut berbentuk compressed liquid.



- dari tabel compressed liquid (tabel A-7) untuk  $P = 5 \text{ Mpa}$  dan  $T = 80^{\circ}\text{C}$  diperoleh  $u = 333,72 \text{ kJ/kg}$

- Dari tabel saturasi (tabel A-4)

$$u \approx u_f @ 80^{\circ}\text{C} = 334,86 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ralat} = \frac{334,86 - 333,72}{333,72} \times 100\% = 0,34\%$$

$$\text{ralat} < 1\%$$

#### D. Persamaan Keadaan Gas Ideal

Disebut juga sebagai The ideal Gas Equalition of state. Setiap persamaan yang menghubungkan tekanan, suhu dan volume spesifik zat disebut persamaan keadaan. Terdapat beberapa persamaan keadaan dari yang sederhana samapai yang rumit. Persamaan yang paling sederhana dan terkenal adalah persamaan keadaan gas ideal. Persamaan ini memprediksikan perilaku P-V-T gas secara akurat. Gas dan uap sering kali dianggap sama fase uap zat bila suhu tersebut diatas suhu kritik. Uap biasanya berupa gas yang tidak jauh dari keadaan kondensasi.

Pada tahun 1662, robert Boyle, seorang inggris, mengamati dalam eksperimennya pada ruang vakum, bahwa tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya. Seratus lima puluh tahun kemudian J. Charles dan J. Gay Lussac, seorang perancis secara eksperimen

menentukan bahwa pada tekanan rendah, volume gas berbanding langsung dengan suhu.

Berdasarkan eksperimen diatas

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

$$P.v=R.T$$

R = Tetapan Gas

Persamaan diatas disebut persamaan keadaan gas ideal atau relasi gas ideal, sehingga gas yang tunduk terhadap persamaan tersebut disebut gas ideal.

Dalam persamaan diatas

P = tekanan absolut

T = suhu absolut

v = Volume spesifik

Tetapan gas R tiap gas berbeda, yaitu

$$R = \frac{R_u}{M} \text{ (kJ/kg.K) atau (kPa.m}^3\text{/kgK)}$$

R<sub>u</sub> = Tetapan gas universal

M = Massa molar (Berat Molekul) gas

R<sub>u</sub> = sama untuk semua zat, yaitu:

$$R_u = \begin{cases} 8,314 & \text{kJ/(kmol.K)} \\ 8,314 & \text{kPa.m}^3\text{/(kmol.K)} \\ 0,08314 & \text{bar.m}^3\text{/(kmol.K)} \\ 1,986 & \text{Btu/(lbmol.R)} \\ 10,73 & \text{psia.ft}^3\text{/(lbmol.R)} \\ 1545 & \text{ft.lbf/(lbmol.R)} \end{cases}$$

Massa molar M didefinisikan sebagai:

Massa satu mole (disingkat gram-mole/gmole) suatu zat dalam gram, atau massa 1 kmol (kgmol) dalam kilogram.

Dalam sistem inggris, 1 lbmol = 0,4536 kmol

Massa molar zat mempunyai nilai numerik yang sama untuk 2 jenis satuan tersebut (SI atau miasal massa molar Nitrogen = 28 berarti massa 1 kmol N<sub>2</sub> = 28 kg, atau massa 1 lbmol N<sub>2</sub> = 28 lbm, sehingga M = 28 kg/kmol = 28 lbm/lbmol

Jumlah mole N, massa molar dan massa mempunyai kaitan :

$$M=M.N$$

Harga R dan M beberapa zat tercantum dalam tabel (A-1). Persamaan gas ideal di atas dapat ditulis dalam beberapa bentuk:

$$V=m.v \rightarrow P.V = m.R.T$$

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

$$V = N \tilde{v} \rightarrow P\tilde{v} = R_u.T$$

Dalam hal ini:

$\tilde{v}$  = volume spesifik molar

= volume per unit mol  
=  $M^3/\text{kmol}$  atau  $\text{ft}^3/\text{lbmol}$

persamaan diatas untuk suatu massa tertentu, pada 2 keadaan berbeda:

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

Gas ideal adalah zat imajiner yang tunduk pada persamaan  $Pv=RT$  menurut eksperimen, persamaan gas ideal diatas kira-kira dekat dengan perilaku P-V-T gas sejati pada densitas yang rendah.

Pada tekanan rendah dan suhu tinggi, densitas gas turun, dan gas berlaku sebagai ideal pada kondisi tersebut. Secara praktis, gas-gas seperti : udara, nitrogen, oksigen, hidrogen, helium, argon, neon, krypton, bahkan gas-gas berat seperti carbon dioksida dapat diperlakukan sebagai gas ideal, dengan mengabaikan kesalahan (<1%)

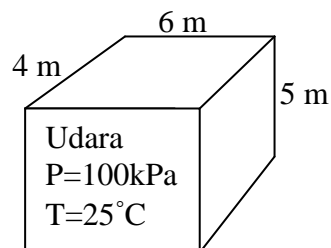
Namun demikian gas-gas seperti: uap air dalam pembangkit tenaga uap, dan uap zat pendingin/refrigerant dalam refrigerator, tidak dapat diperlakukan sebagai gas ideal.

Contoh:

Hitunglah massa udara dalam ruangan yang berukuran 4m x 5m x 6m pada tekanan 100 kPa dan suhu 25°C

Jawab :

Udara dalam hal ini dianggap gas ideal, menurut tabel A-1 tetapan gas untuk udara  $R = 0,287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$  sedangkan  $T = 25^\circ\text{C} + 273 = 298\text{K}$

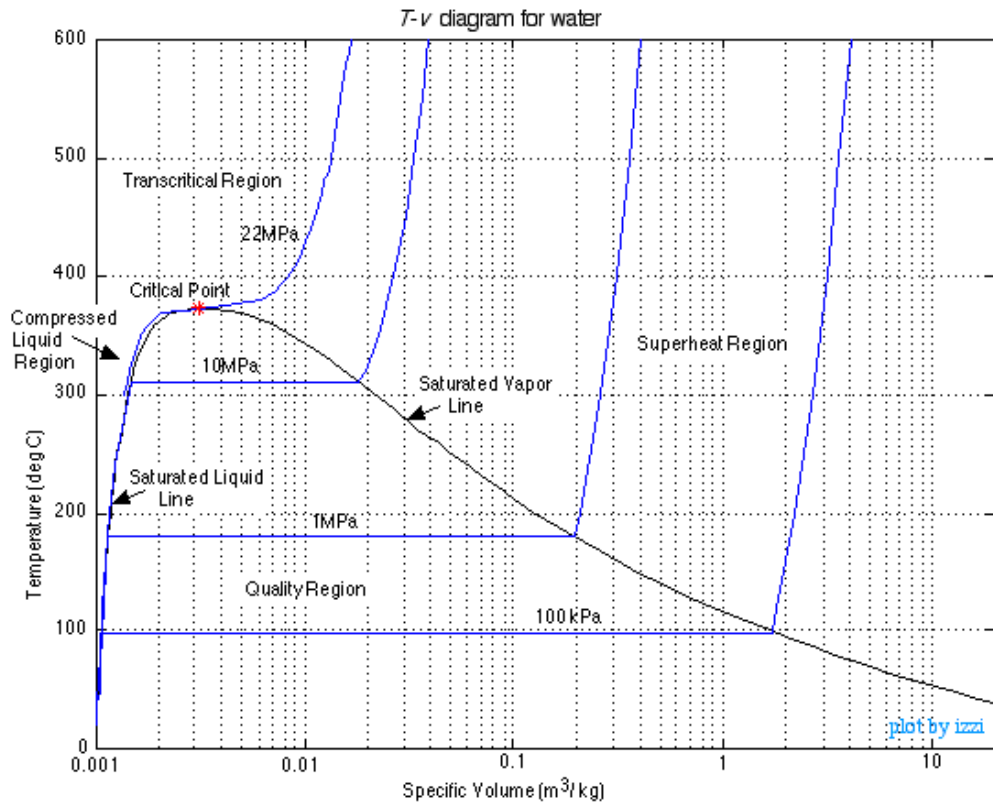


Volume ruangan

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

$$M = \frac{P.V}{R.T} = \frac{(100\text{kPa})(120\text{m}^3)}{0,287\text{kPa}\cdot\text{m}^3 / \text{kg}, \text{K})(298\text{K})}$$
$$= 140,3 \text{ kg}$$

Petanyaan selanjutnya mengenai gas ideal adalah "apakah Uap air merupakan gas ideal?" suatu hal yang perlu diperbaiki jika uap air dianggap gas ideal, sebab hal tersebut dilukiskan pada tabel dibawah ini



Gambar 45. Diagram T-v pada air

Pada tekanan < 10 kPa uap air dianggap gas ideal (tanpa memperhitungkan suhu) dengan ralat dibawah 1%. Pada tekanan kurang dari 10 kPa, ralat yang diberikan semakin besar terutama pada titik kritis dan garis uap jenuh. Pada sistem AC, uap air di udara adalah gas ideal ( $P \ll$ ). Namun pada pembangkit tenaga uap tidak berlaku gas ideal.

### E. Faktor Kompresibilitas

Faktor kompresibilitas adalah ukuran penyimpangan dari perilaku gas ideal. Penyimpangan dari perilaku gas ideal pada suhu dan tekanan tertentu dapat ditentukan dengan memunculkan suatu faktor koreksi yang disebut faktor kompresibilitas, Z.

$$Z = \frac{P \cdot v}{R \cdot T}$$

Atau

$$P \cdot v = Z \cdot R \cdot T$$

Dapat juga ditunjukkan dengan

$$Z = \frac{v_{aktual}}{v_{ideal}}$$

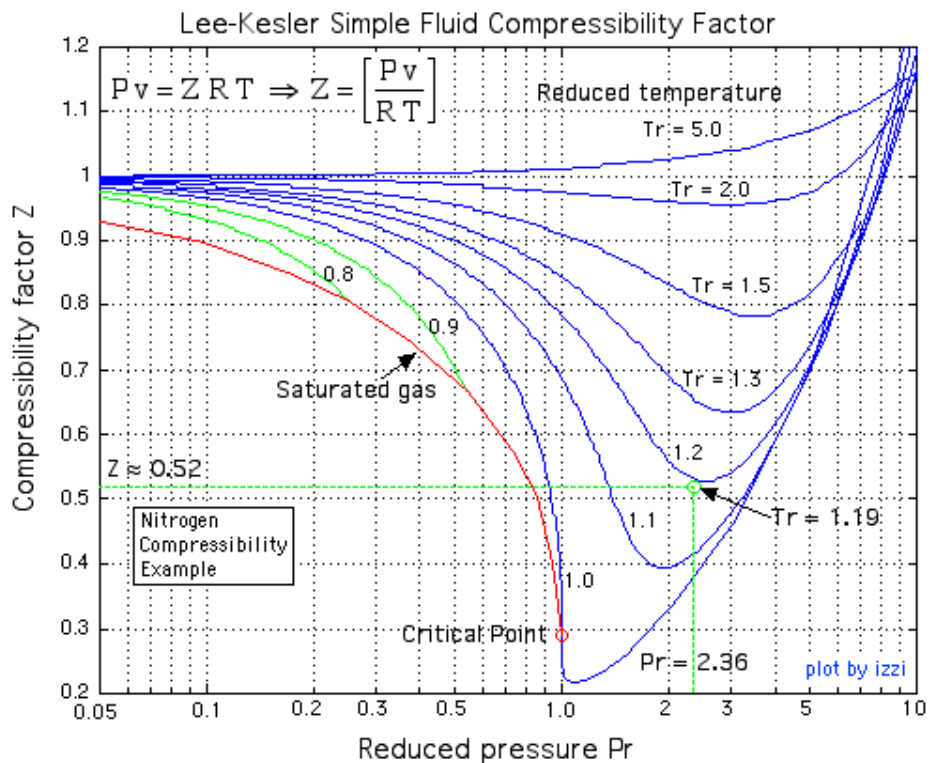
Z = 1 untuk gas ideal

Untuk gas sejati, z dapat lebih besar atau lebih kecil dari satu. Makin jauh z dari harga diatas, gas makin menyimpang dari gas ideal. Gas berlaku beda pada suhu dan tekanan tertentu, tetapi berlaku sama pada suhu dan tekanan yang diormalkan masing-masing terhadap suhu dan tekanan kritisnya, yaitu:

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} \quad T_R = \frac{T}{T_{cr}}$$

$P_R$  = Tekanan Reduksi;  $T_R$  = suhu reduksi

Faktor z untuk semua kira-kira bernilai sama pada suhu dan tekanan reduksi yang sama. Hal ini disebut prinsip hubungan keadaan. Secara eksperimen z dapat digambarkan dengan grafik sebagai berikut (untuk berbagai gas)



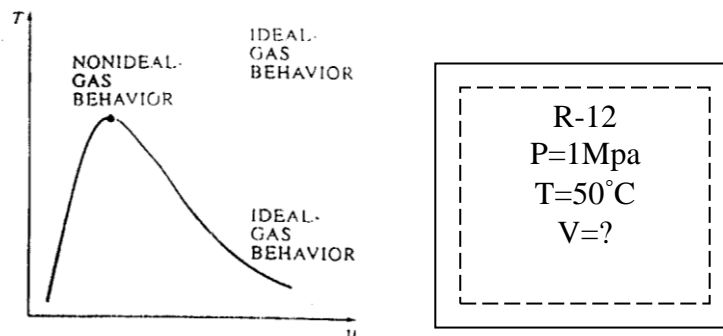
Gambar 46. Diagram Faktor Kompresi (z)

Contoh 1:

Hitunglah volume spesifik Refrigerant-12 pada tekanan 1 Mpa dan suhu 50°C menggunakan:

- Tabel R-12
- Keadaan Gas ideal
- Grafik kompresibilitas umum, juga hitunglah ralat pada (b) dan (c)

Jawab:



Berdasarkan tabel A-1 untuk refrigerant-12 diperoleh:

$$R = 0,0688 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$P_{cr} = 4,01 \text{ Mpa}$$

$$T_{cr} = 384,7 \text{ K}$$

a. Volume spesifik refrigerant-12 dihitung dari tabel A-13, untuk:

$$P = 1 \text{ Mpa}$$

$$T = 50^\circ \text{C}$$

$$\rightarrow v = 0,01837 \text{ m}^3/\text{kg}$$

b. Volume spesifik refrigerant-12 dibawah asumsi gas ideal dihitung dari:

$$v = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{[0,0688 \text{ kPa} \cdot \text{M}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})](323 \text{ K})}{1000 \text{ kPa}}$$

$$= 0,02222 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Ralat} = (0,02222 - 0,01837) / 0,01837$$

$$= 0,208 \text{ atau } 20,8\%$$

c. Dengan grafik kompresibilitas z:

$$P_R = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{1 \text{ MPa}}{4,01 \text{ MPa}} = 0,249$$

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{323 \text{ K}}{384,7 \text{ K}} = 0,840$$

$$Z = \frac{v_{\text{aktual}}}{v_{\text{ideal}}} \rightarrow v_{\text{aktual}} = Z \cdot v_{\text{ideal}}$$

$$= (0,83)(0,02222 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$= 0,01844 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ralat dalam hal ini kurang dari 1%

Bila P dan v, atau T dan v menggantikan P dan T, diagram kompresibilitas umum masih dapat digunakan untuk menentukan properti ketiga, tetapi dengan coba-coba (\*trial and error). Didefinisikan satu properti yang disebut *pseudo-reduced specific volume*,  $V_R$

$$V_R = \frac{v_{\text{aktual}}}{R \cdot T_{cr} / P_{cr}}$$



Contoh 2:

Hitunglah tekanan uap air pada 600°F dan 0,514 ft<sup>3</sup>/lbm, menggunakan:

- Tabel uap
- Persamaan gas ideal
- Diagram kompresibilitas umum

Jawab:

Menurut Tabel A-1E (uap) diperoleh

$$R = 0,5956 \text{ ft}^3/(\text{lbm}\cdot R)$$

$$P_{cr} = 3204 \text{ psia}$$

$$T_{cr} = 1165,3$$

- Menurut Tabel A-6E (uap) untuk:

$$V = 0,514 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$T = 600^\circ F$$

Diproleh nilai  $P = 1000 \text{ psia}$

- Dengan asumsi uap sebagai gas ideal:

$$P = \frac{RT}{v} = \frac{[0,5956 \text{ psia}\cdot \text{ft}^3 / \text{lbm}\cdot R](1060\cdot R)}{0,514 \text{ ft}^3 / \text{lbm}}$$

$$= 1228,3 \text{ psia}$$

$$\text{Ralat} = \frac{1228 - 1000}{1000} = 0,228 \text{ atau } 22,8\%$$

- Dengan diagram kompresibilitas:

$$V_R = \frac{v_{\text{aktual}}}{R\cdot T_{cr}} = \frac{(0,514 \text{ ft}^3)(3204 \text{ psia})}{[0,5956 \text{ psia}\cdot \text{ft}^3 / (\text{lbm}\cdot R)(1165,3R)}$$
$$= 2,373$$

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{1060R}{1165R} = 0,91$$

Berdasar  $V_R$  dan  $T_R \rightarrow P_R = 0,33$

$$P = P_R \cdot P_{cr} = (0,33)(3204) \text{ psia} = 1057,3 \text{ psia}$$

## F. Persamaan keadaan lain

Persamaan gas ideal sangat sederhana, tetapi penerapannya terbatas. Apabila diinginkan persamaan keadaan yang menunjukkan perilaku P-v-T zat secara akurat, lebih luas tanpa batas. Maka persamaan tersebut akan menjadi lebih rumit.

Terdapat 3 persamaan yang akan dibahas yaitu:

- Persamaan van der waals (paling awal)
- Persamaan Beattie-Bridgeman (terkenal dan akurat)
- Persamaan Benedict-Webb-Rubin (lebih mutakhir dan sangat akurat)

Berikut akan dijelaskan mengenai persamaan-persamaan diatas

1. Persamaan keadaan van der Waals

Persamaan ini diajukan tahun 1873, mempunyai 2 konstanta yang ditentukan dari perilaku zat pada titik kritis. Persamaan tersebut adalah

$$(P + \frac{a}{v^2})(v-b) = R.T$$

$$(\frac{\partial P}{\partial v})_{T=T_{cr}=Konstan} = 0$$

$$(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2})_{T=T_{cr}=Konstan} = 0$$

Diferensiasi dan eliminasi  $V_{cr}$

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

2. Persamaan Beattie-Bridgeman

Persamaan ini diajukan tahun 1928, yaitu persamaan keadaan yang didasarkan pada lima konstanta hasil eksperimen. Persamaan tersebut adalah:

$$P = \frac{RvT}{\nabla^2} (1 - \frac{c}{\nabla T^3})(\tilde{V} + B) - \frac{A}{\nabla^2}$$

$$A = A_0(1 - \frac{a}{\nabla})$$

$$B = B_0(1 - \frac{b}{\nabla})$$

Persamaan ini akurat untuk densitas di atas 0,8  $P_{cr}$ , dimana  $P_{cr}$  adalah densitas zat pada titik kritis.

3. Persamaan Keadaan Benedict-Webb-Rubin

Benedict-Webb dan Rubin memperluas persamaan Beattie-Bridgeman di tahun 1940 dengan memunculkan angka konstanta menjadi delapan. Persamaan tersebut adalah:

$$P = \frac{Ru.T}{\nabla} + (B_0RuT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}) \frac{1}{\nabla^2} + \frac{bRuT - a}{\nabla^3} + \frac{a\alpha}{\nabla^6} + \frac{c}{\nabla^3 T^2} (1 + \frac{\gamma}{\nabla^2}) e^{-\frac{\gamma}{\nabla^2}}$$

4. Persamaan Keadaan Virial

Persamaan keadaan zat dapat juga ditulis dalam bentuk deret:

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

Persamaan diatas disebut persamaan keadaan virial.  $A(T)$ ,  $b(T)$ ,  $c(T)$  dan seterusnya disebut koefisien virial.

Contoh 1:

Buatlah prediksi tekanan gas nitrogen pada  $T=175K$  dan  $v=0,00375 \text{ m}^3/\text{kg}$  pada basis: (a) Tabel nitrogen, (b) Persamaan gas Ideal, (c)

Persamaan Van Der Waals, (d) Persamaan keadaan Beattie-Bridgeman dan (d) Persamaan Benedict-Rubin-Webb

Jawab:

- a. Dari tabel superheated nitrogen (tabel A-16) pada

$$T = 175K$$

$$V = 0,00375 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Diperoleh nilai } P = 10 \text{ Mpa} = 10\,000 \text{ kPa}$$

- b. Dengan Persamaan Gas Ideal

$$P = \frac{R.T}{v} = \frac{[0,297 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kgK}](175K)}{0,00375 \text{ m}^3 / \text{kg}}$$

$$= 13\,860 \text{ kPa}$$

(dengan error 38,6%)

- c. Konstanta Van Der Waals untuk Nitrogen.

$$a = 0,175 \text{ m}^6 \cdot \text{kPa}/\text{kg}^2$$

$$b = 0,00138 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P = \frac{R.T}{v-b} - \frac{a}{v^2} = 9465 \text{ kPa}$$

(dengan error 5,4%)

- d. Konstanta Beattie-Bridgeman diperoleh dari Tabel A-29a:

$$A = 102,29$$

$$B = 0,05378$$

$$C = 4,2 \times 10^4$$

$$\tilde{v} = M.v = (28,013 \text{ kg}/\text{kmol})(0,00375 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$= 0,10505 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

$$P = \frac{RvT}{\tilde{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\tilde{v}T^3}\right) (\tilde{v} + B) - \frac{A}{\tilde{v}^2} = 10,110 \text{ kPa}$$

(dengan error 1,1%)

- e. Konstanta Benedict-Webb-Rubbin dicari dari Tabel A-29b:

$$a = 2,54 \quad A_0 = 106,73$$

$$b = 0,002328 \quad B_0 = 0,04074$$

$$c = 7,379 \times 10^4 \quad C_0 = 8,164 \times 10^5$$

$$\alpha = 1,272 \times 10^{-4} \quad \gamma = 0,0053$$

Nilai-nilai diatas dimasukkan dalam persamaan

$$P = \frac{Ru.T}{\tilde{v}} + (B_0 Ru.T - A_0 - \frac{C_0}{T^2}) \frac{1}{\tilde{v}^2} + \frac{bRu.T - a}{\tilde{v}^3} + \frac{a\alpha}{\tilde{v}^6} + \frac{c}{\tilde{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\tilde{v}^2}\right) e^{-\frac{\gamma}{\tilde{v}^2}}$$

$$= 10\,009 \text{ kPa}$$

(dengan error 0,09%)

## G. Kesimpulan

## H. Soal-Soal