هر آن که جانب اهل خدا نگه دارد
خداش در همه حال از بلا نگه دارد
حدیث دوست نگویم مگر به حضرت دوست
که آشنا سخن آشنا نگه دارد

فصل سوم: خواص مواد خالص

Properties of Pure Substances

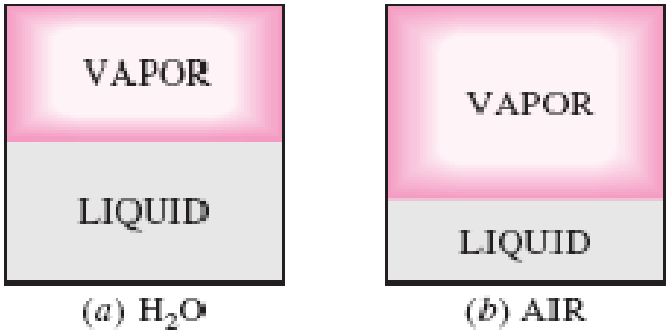
اکبر اقبالی

WWW.AEGHBALI.BLOG.IR
EGHBALI.D@GMAIL.COM

1393

مقدمه

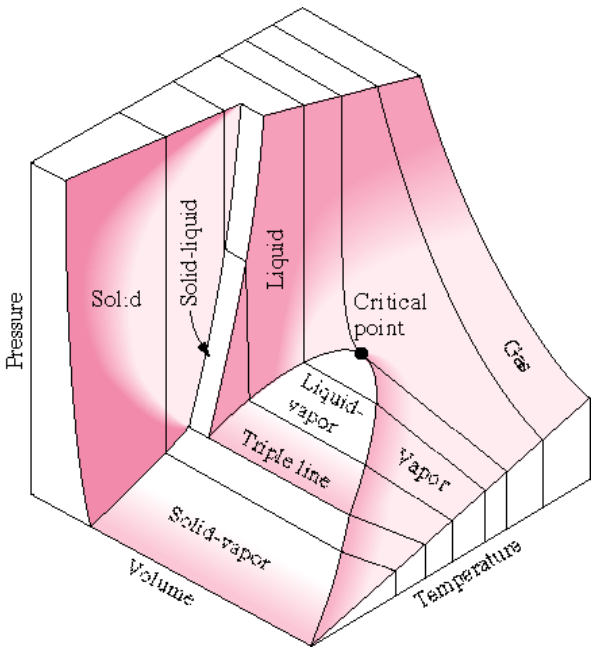
- سیستم ساده: فاقد حرکت، ویسکوزیته، تنش برشی سیال، موئینگی، تنشهای غیر ایزوتروپ و میدان نیروی خارجی.
- ماده همگن: دارای خواص ترمودینامیکی یکنواخت در سرتاسر ماده.
- ماده خالص: ماده ای همگن با ترکیب شیمیایی تغییرناپذیر است که می تواند بیش ازیک فاز داشته باشد.
- حالت مبنا برای یک ماده خالص با دو خاصیت شدتی تعیین می شود.

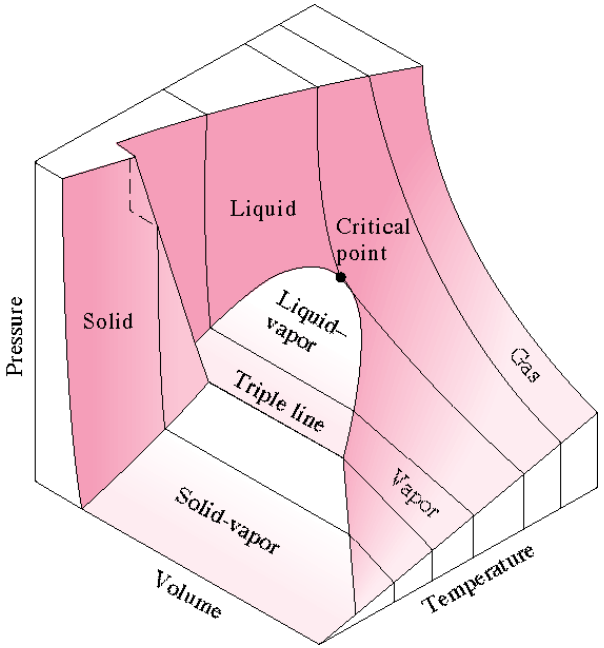


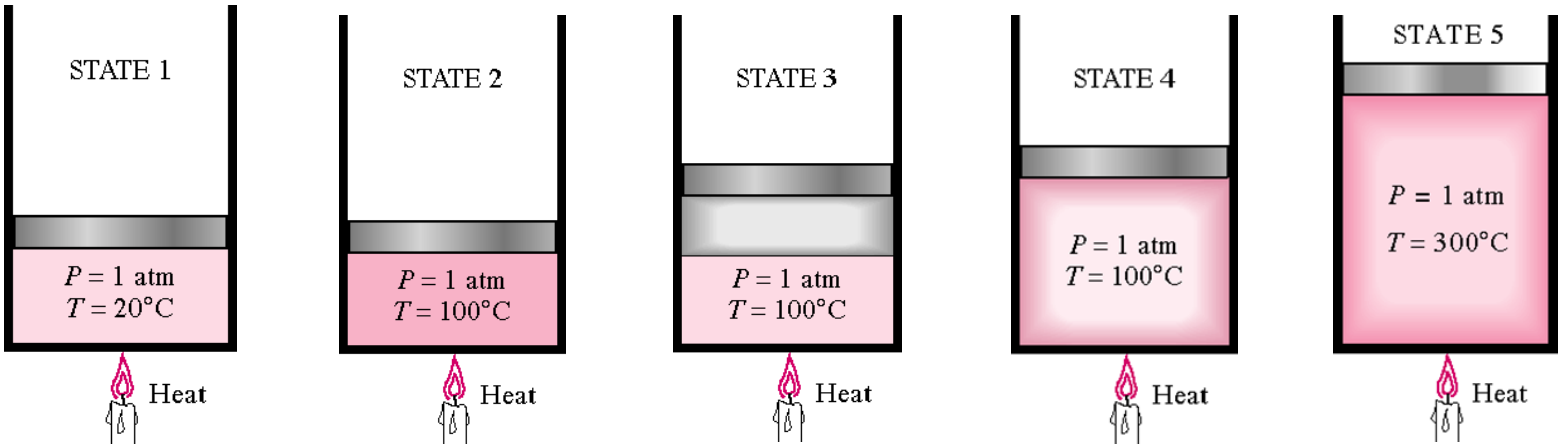
1. *Water (solid, liquid, and vapor phases)*
2. *Mixture of liquid water and water vapor*
3. *Carbon dioxide, CO_2*
4. *Nitrogen, N_2*
5. *Mixtures of gases, such as air, as long as there is no change of phase.*

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

نمودار صفحه ای P-v-T

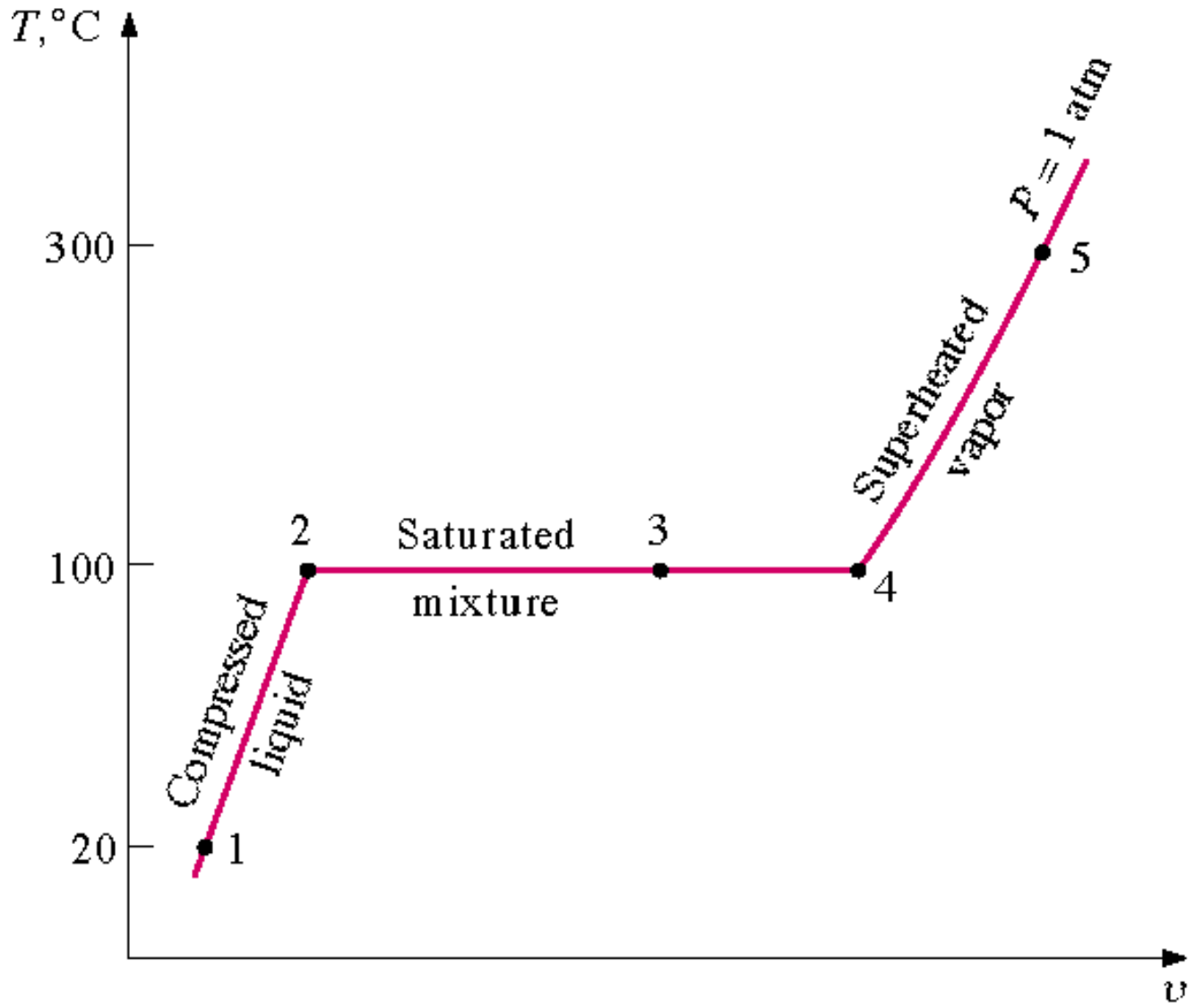






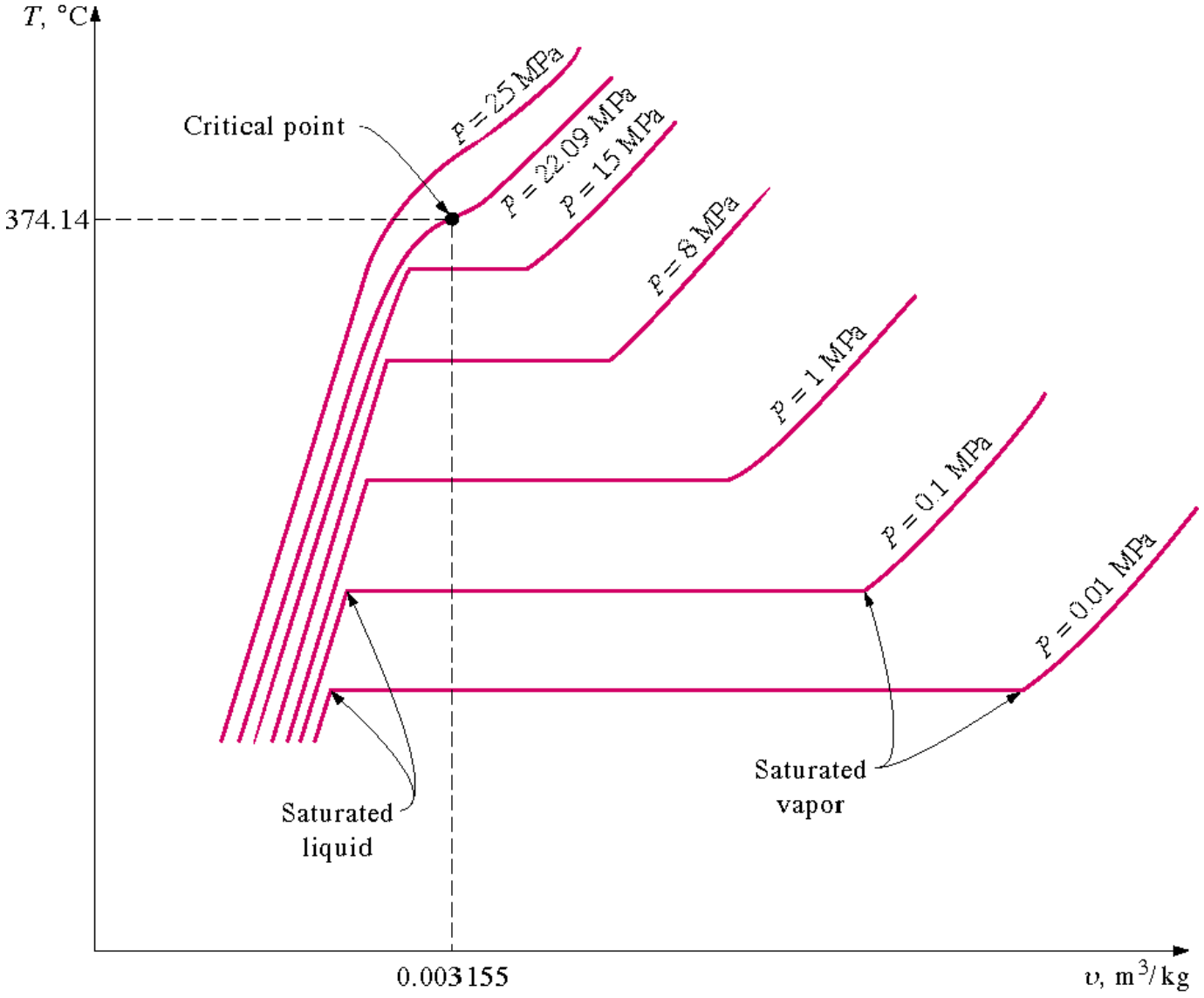
مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

نمودار صفحه ای P-v-T



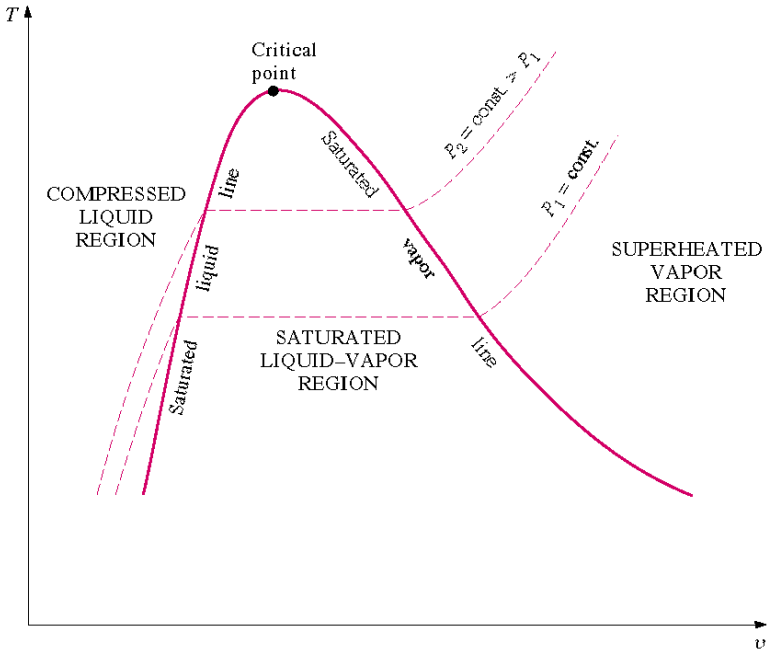
مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

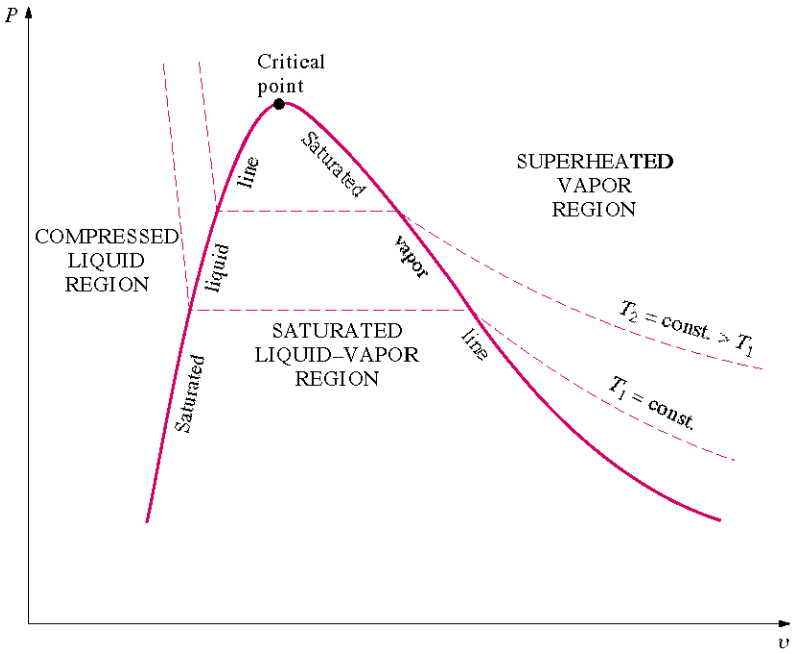
نمودار صفحه ای P-v-T



مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

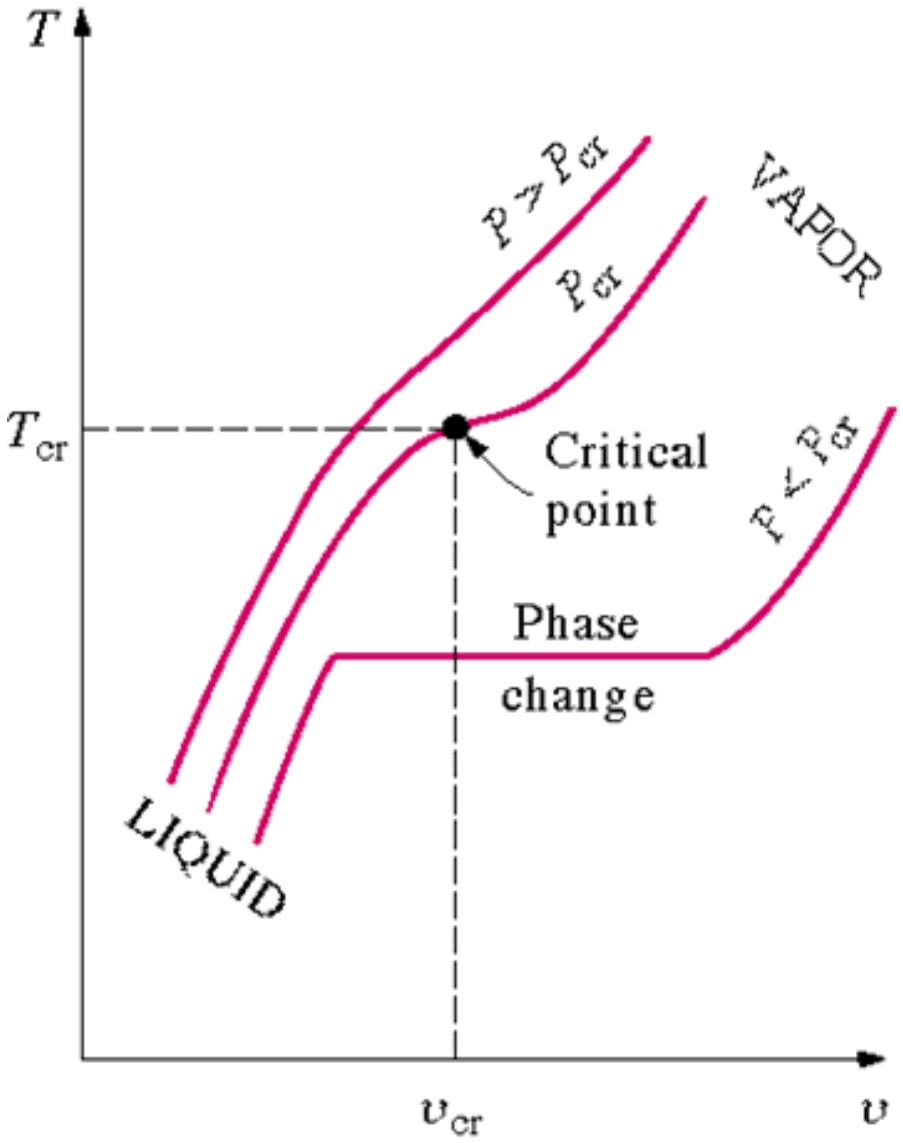
فرآیندها برای نمودار صفحه ای P-v-T





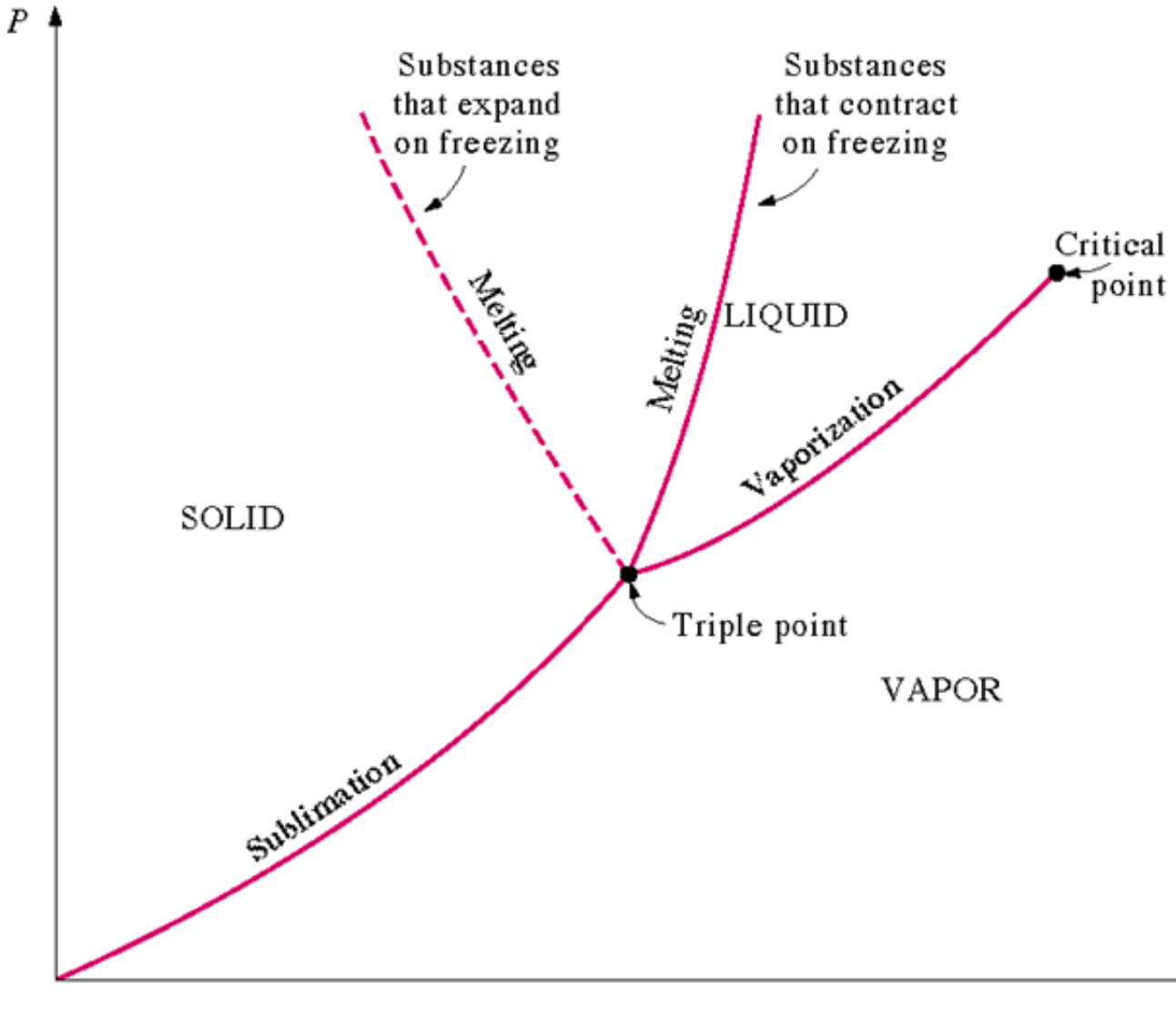
مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

فرآیندها برای نمودار صفحه ای P-v-T



مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

فرآیندها برای نمودار صفحه ای P-v-T



مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

Temp., T °C	Sat. Press., P_{sat} kPa	*Specific volume,* m³/kg		*Internal energy,* kJ/kg			*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.00	2374.9	2374.9	0.00	2500.9	2500.9	0.000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.02	2360.8	2381.8	21.02	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.228	0.001000	106.32	42.02	2346.6	2388.7	42.02	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.706	0.001001	77.885	62.98	2332.5	2395.5	62.98	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.339	0.001002	57.762	83.91	2318.4	2402.3	83.91	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.170	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.247	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.629	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.385	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.595	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.35	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.76	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.768	7.2218	7.9898
60	19.95	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.04	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.20	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.60	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.42	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.87	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.18	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.61	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
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
360	18666	0.001895	0.00695	1726.16	625.7	2351.9	1761.53	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537

مقدمه

صفحه P-V-T

فرآیندها

جدول خواص

خواص اشباع

ترکیبات فازی

جدول خوانی

معادله حالت

Press. P kPa	Sat. Temp., T_{sat} °C	*Specific volume,* m³/kg			*Internal energy,* kJ/kg		*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.6117	0.01	0.001000	206.00	0.00	2374.9	2374.9	0.00	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.30	2355.2	2384.5	29.30	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.69	2338.1	2392.8	54.69	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.43	2325.5	2398.9	73.43	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.42	2315.4	2403.8	88.42	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
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
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.62	391.9	2233.5	1887.97	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.65	140.8	2092.4	2011.12	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.8	0	2015.8	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

مقدمه

صفحه P-V-T

فرآیندها

جدول خواص

خواص اشباع

ترکیبات فازی

جدول خوانی

معادله حالت

خواص ترمودینامیکی در حالت اشباع

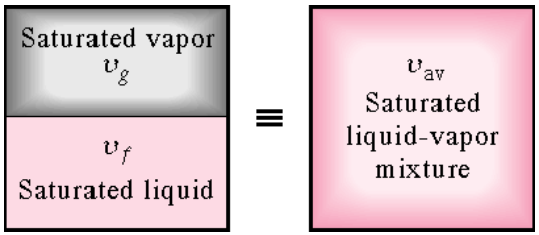
- **فشار اشباع:** عبارتست از فشاری که فازهای مایع و بخار در دمای مشخصی در تعادل هستند.
- **دمای اشباع:** عبارتست از دمایی که فازهای مایع و بخار در فشار مشخصی در تعادل هستند.

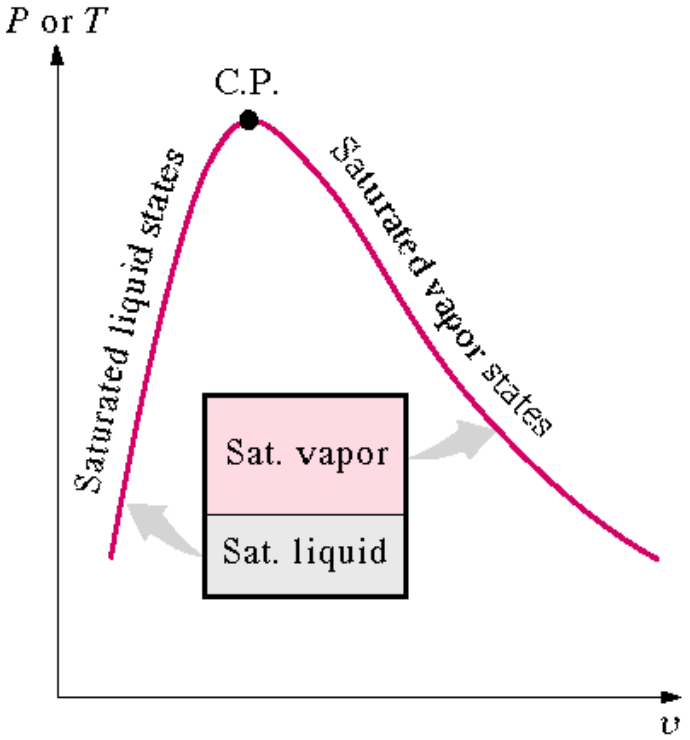
$$u_{fg} = u_g - u_f$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

$$s_{fg} = s_g - s_f$$

$$x = \frac{mass_{saturated\ vapor}}{mass_{total}} = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$





مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

خواص ترمودینامیکی برای ترکیب مایع - بخار

$$V = V_f + V_g$$

$$m = m_f + m_g$$

$$V = mv, \quad V_f = m_f v_f, \quad V_g = m_g v_g$$

$$mv = m_f v_f + m_g v_g$$

$$v = \frac{m_f v_f}{m} + \frac{m_g v_g}{m}$$

- با تعریفی که از x ارائه شد خواهیم داشت:

$$x = \frac{m_g}{m} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \qquad \frac{m_f}{m} = \frac{m - m_g}{m} = 1 - x$$

- لذا برای حجم مخصوص ترکیب مایع – بخار خواهیم داشت:

$$v = (1-x)v_f + xv_g \qquad v = v_f + x(v_g - v_f)$$

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

خواص ترمودینامیکی برای ترکیب مایع - بخار

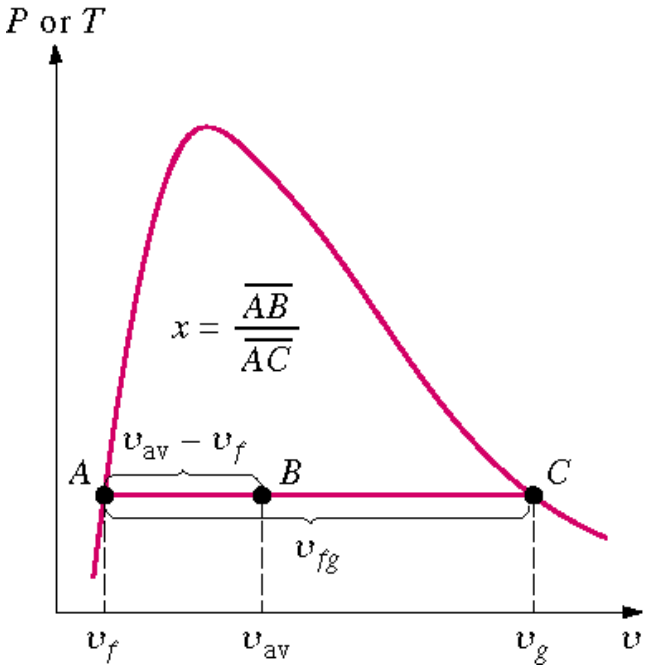
- برای هر خاصیت در واحد جرم (v, u, h, s) خواهیم داشت:

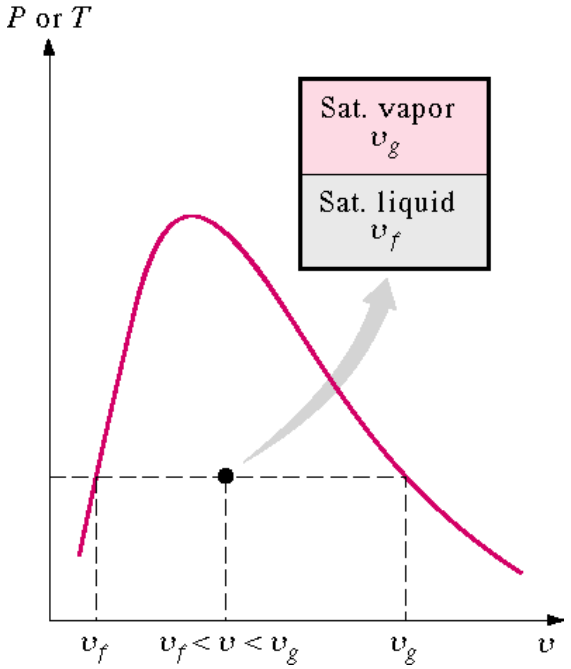
$$y = \frac{Y}{m} = y_f + x(y_g - y_f)$$

$$= y_f + x\, y_{fg}$$

$$x = \frac{y - y_f}{y_{fg}}$$

where $y_{fg} = y_g - y_f$





مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

خواص ترمودینامیکی در حالت مافوق گرم

- در یک فشار مشخص، دمایی بالاتر از دمای اشباع دارد.
- دما و فشار از هم مستقل هستند.
- مقدار دمای سمت راست فشار، دمای اشباع برای آن فشار است.
- اولین ورودی به جدول, حالت بخار اشباع در فشار مورد نظر است.

TABLE A-6 Superheated water

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 0.01 MPa (45.81°C)			
Sat.	14.670	2437.2	2583.9	8.1488
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 0.05 MPa (81.32°C)			
Sat.	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931
100	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953
150	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413
200	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592
250	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568
300	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387
400	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659
500	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566
600	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201
700	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626
800	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883
900	10.828	3856.8	4398.2	10.1000
1000	11.751	4055.2	4642.7	10.3000
1100	12.675	4259.9	4893.7	10.4897
1200	13.598	4470.8	5150.7	10.6704
1300	14.521	4687.3	5413.3	10.8429

خواص ترمودینامیکی در حالت آب متراکم

- در یک دمای مشخص، فشاری بالاتر از فشار اشباع دارد.

TABLE A-7 Compressed liquid water

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 5 MPa (263.94°C)			
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 10 MPa (311.00°C)			
Sat.	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603
0	0.0009952	0.12	10.07	0.0003
20	0.0009973	83.31	93.28	0.2943
40	0.0010035	166.33	176.37	0.5685
60	0.0010127	249.43	259.55	0.8260
80	0.0010244	332.69	342.94	1.0691
100	0.0010385	416.23	426.62	1.2996
120	0.0010549	500.18	510.73	1.5191
140	0.0010738	584.72	595.45	1.7293
160	0.0010954	670.06	681.01	1.9316
180	0.0011200	756.48	767.68	2.1271
200	0.0011482	844.32	855.80	2.3174
220	0.0011809	934.01	945.82	2.5037
240	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876
260	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710
280	0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565
300	0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

خواص ترمودینامیکی برای اشباع یخ و بخار

- در دمای کمتر از دمای نقطه سه گانه، فازهای یخ و بخار در تعادلند.
- نسبت کیفیت در اینجا، جرم بخار نسبت به جرم دو فاز است.
- تغییر مستقیم از حالت جامد به حالت بخار را تصعید گویند.

TABLE A-8
Saturated ice-water vapor

Temp., T °C	Sat. Press., P_{sat} kPa	*Specific volume*, m³/kg		*Internal energy*, kJ/kg			*Enthalpy*, kJ/kg			*Entropy*, kJ/kg·K		
		Sat. ice, v_i	Sat. vapor, v_g	Sat. ice, u_i	Subl., u_{ig}	Sat. vapor, u_g	Sat. ice, h_i	Subl., h_{ig}	Sat. vapor, h_g	Sat. ice, s_i	Subl., s_{ig}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.0010909	206.0	-333.40		2374.5	-333.40		2500.5	-1.220		9.154
0	0.6112	0.0010909	206.2	-333.43	2707.9	2374.5	-333.43	2833.9	2500.5	-1.220	10.375	9.154
-2	0.5177	0.0010905	241.6	-337.63	2709.4	2371.8	-337.63	2834.5	2496.8	-1.236	10.453	9.218
-4	0.4375	0.0010902	283.8	-341.80	2710.8	2369.0	-341.80	2835.0	2493.2	-1.251	10.533	9.282
-6	0.3687	0.0010898	334.3	-345.94	2712.2	2366.2	-345.93	2835.4	2489.5	-1.267	10.613	9.347
-8	0.3100	0.0010895	394.7	-350.04	2713.5	2363.5	-350.04	2835.8	2485.8	-1.282	10.695	9.413
-10	0.2599	0.0010892	467.2	-354.12	2714.8	2360.7	-354.12	2836.2	2482.1	-1.298	10.778	9.480
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
-36	0.0200	0.0010850	5460.1	-404.40	2729.0	2324.6	-404.40	2838.4	2434.0	-1.499	11.969	10.470
-38	0.0161	0.0010847	6750.5	-408.07	2729.9	2321.8	-408.07	2838.4	2430.3	-1.514	12.071	10.557
-40	0.0128	0.0010844	8376.7	-411.70	2730.7	2319.0	-411.70	2838.3	2426.6	-1.530	12.174	10.644

$$y_{ig} = y_g - y_i$$

$$y = y_i + x\, y_{ig}$$

$$x = \frac{m_g}{m_i + m_g}$$

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

اصول جدول خوانی

- مقایسه خواص معلوم حالت با خواص حالت اشباع.
- داشتن فشار یا دما، به همراه یک خاصیت دیگر.
- اگر فشار و حجم مخصوص مشخص باشد، برای فشار مورد نظر:

$v < v_f$? مایع متراکم: جدول مایع متراکم

$v_f < v < v_g$? حالت اشباع: معادلات اشباع.

$v_g < v$? بخار مافوق گرم: جدول بخار مافوق گرم

$$u = h - Pv$$

معادله حالت

- به رابطه بین فشار، دما و حجم مخصوص معادله حالت گفته می شود.
- معادله حالت برای فاز گاز و بخار، تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود.
- گاز ایده آل: گازی که رابطه بویلی و چارلی برای آن صادق است.

$$F(P,T,v)\equiv 0$$

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

$$Pv = RT$$

$$R = \frac{R_u}{M}$$

$$Pv = RT$$

$$PV = \frac{m}{M}(MR)T$$

$$P\frac{V}{m} = RT$$

$$PV = NR_uT$$

$$m = N\,M$$

$$PV = mRT$$

$$P\frac{V}{N} = R_uT$$

$$P\bar{v} = R_uT$$

$$M_{air} = 28.97\frac{g}{gmol} = 28.97\frac{kg}{kmol} = 28.97\frac{lbm}{lbmol}$$

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

ضریب تراکم پذیری در معادله حالت

$$P\bar{v} = Z R_u T \qquad Z = \frac{P\bar{v}}{R_u T}$$

- برای محاسبه انحراف از گازایده آل.
- برای گاز ایده آل $Z=1$ است.
- ضریب تراکمپذیری تابعی از فشارودمای اصلاح شده.

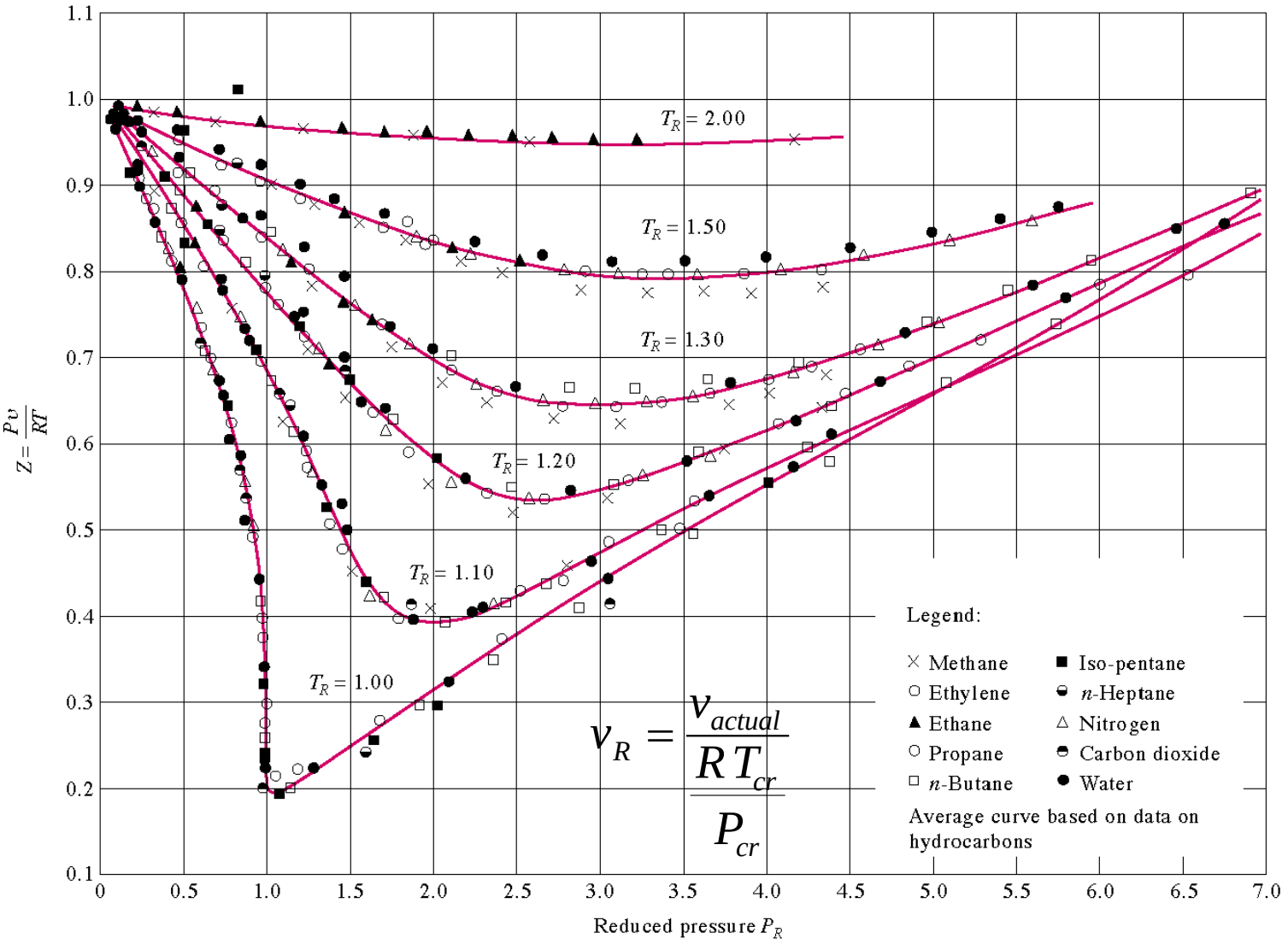
$$T_R = \frac{T}{T_{cr}} \quad \text{and} \quad P_R = \frac{P}{P_{cr}}$$

- مقادیر بحرانی فشار و ودما در جدول (A-1) ارائه شده است.

$$v_R = \frac{v_{actual}}{\frac{R T_{cr}}{P_{cr}}}$$

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

ضریب تراکم پذیری در معادله حالت



مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

سایر معادلات در معادله حالت

Van der Waals: $(P+\frac{a}{v^2})(v-b)=RT$ $\begin{cases} a=\frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \\ b=\frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \end{cases}$

Beattie-Bridgeman:

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

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

Benedict-Webb-Rubin:

$$P=\frac{R_uT}{\bar{v}}+\left(B_oR_uT-A_o-\frac{C_o}{T^2}\right)\frac{1}{\bar{v}^2}+\frac{bR_uT-a}{\bar{v}^3}$$

$$+\frac{a\alpha}{\bar{v}^6}+\frac{c}{\bar{v}^3T^2}\left(1+\frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right)e^{-\gamma/\bar{v}^2}$$

مقدمه
صفحه P-V-T
فرآیندها
جدول خواص
خواص اشباع
ترکیبات فازی
جدول خوانی
معادله حالت

هر گاه خدا بخواهد بنده ای را خوار کند،

دانش را از او دور سازد.

امیر مؤمنان، امام علی علیه السلام