

۱ ترمودینامیک

استاد:

سیدعلی صدر واقفی

۱۳۹۹



بورگناک - زونتاگ - (ون وایلن)

ویرایش ہفتم

چاپ سی و ششم

مبانی ترمودینامیک



ترجمہ:

مهندس غلام رضا ملک زادہ

مهندس محمد حسین کاشانی حصار

فصل دوم ؛ ماده خالص

تعریف ماده خالص

تعادل فازهای مایع و بخار در یک ماده خالص

حالت اشباع (سیر شدن)

بخار داغ (سوپرهیت)

مایع متراکم

عیار (کیفیت)

دیاگرام دما - حجم

دیاگرام فشار - حجم

نقطه سه گانه

جدول ترمودینامیکی

فصل دوم

ماده خالص و خواص آن

ماده خالص:

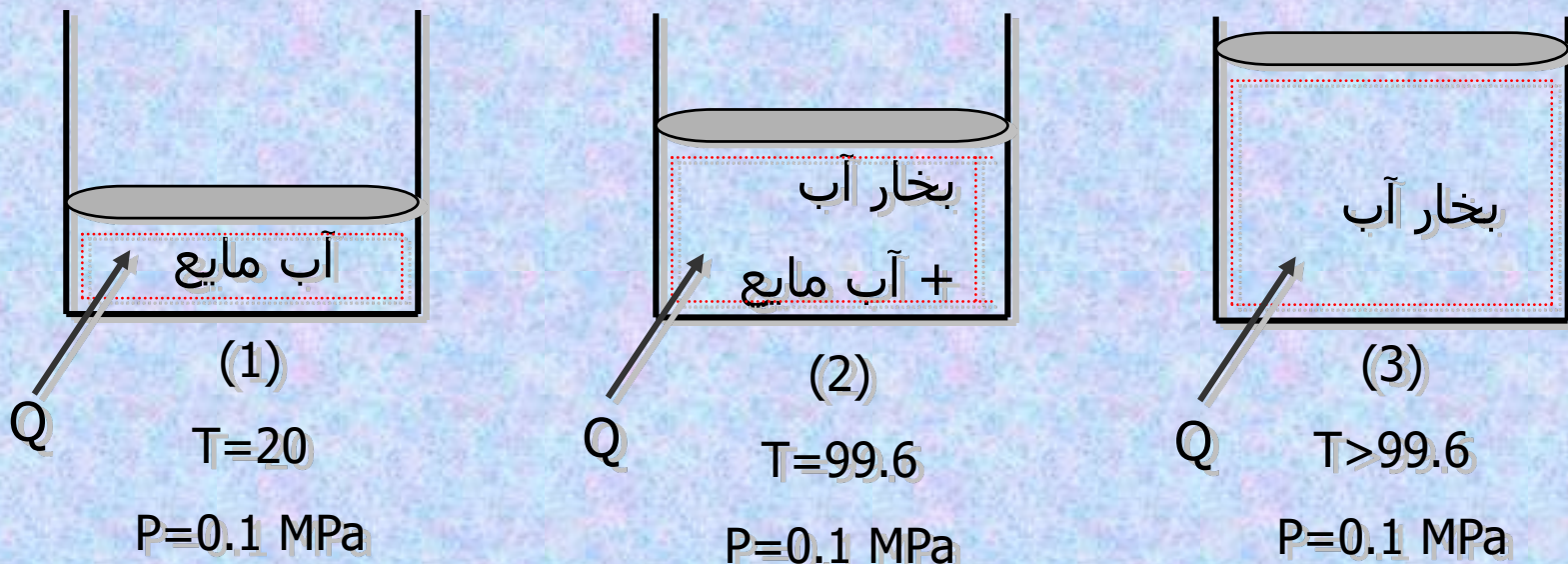
ماده‌ای که ترکیب شیمیایی آن همگن و یکنواخت باشد، چنین ماده‌ای ممکن است در بیش از یک فاز وجود داشته باشد، اما ترکیب شیمیایی آن در همه فازها یکسان است. بنابراین مخلوط آب مایع و بخار آب یا مخلوط آب و یخ همگی مواد خالص بشمار می‌آیند.

توجه:

مخلوط هوای مایع و هوای گازی یک ماده خالص نیست زیرا ترکیب شیمیایی هوا در این دو فاز با یکدیگر فرق می‌کند اما می‌توان مخلوطی مانند هوا را که از چند گاز تشکیل شده است تا وقتی که تغییر فازی در بین نباشد بعنوان یک ماده خالص فرض کرد. در این صورت مخلوطی مثل هوا را می‌توان بعنوان ماده خالص در نظر گرفت، هر چند این فرض خطای بسیار ناچیزی دارد.

تعادل فازهاي مختلف در يك ماده خالص

در مجموعه سيلندر پيستون شكل فوق 1Kg آب را بعنوان سيستم در نظر مي گيريم فرض مي كنيم كه پيستون و فشار اتمسفر 100 KPa فشار در سيستم بوجود آورده و دماي اوليه 20°C باشد، با انتقال گرما به آب دماي آن افزايش مي يابد و حجم ويژه كمي زياد مي شود و فشار ثابت مي ماند (شكل 1) هنگامي كه دما به 99.6°C رسيد انتقال گرمائي بيشتر باعث افزايش دما نمي شود بلكه باعث تغيير فاز سيستم از مايع به بخار مي گردد (شكل 2). در اين حالت مولكولهاي مايع يكي يكي به بخار تبديل مي شوند در طي اين فرايند دما و فشار ثابت مي ماند و حجم ويژه افزايش چشمگيري خواهد يافت هنگامي كه آخرين ذره مايع تبخير شد با ادامه يافتن انتقال حرارت دما نيز به مانند حجم ويژه افزايش مي يابد.



نکته: تغییر فاز در طی فرایند فشار ثابت و دما ثابت انجام می‌شود.

نکته: در تغییر فاز فقط و فقط یک فشار برای هر دمای مشخص وجود دارد.

دمای اشباع: دمایی که در آن تبخیر در فشاری معین رخ می‌دهد را دمای اشباع یا سیر شدن می‌نامند. این فشار را نیز فشار سیر شدن برای آن دما می‌نامند. بنابراین با توجه به مثال قبل برای آب 99.6°C فشار سیر شدن برابر 0.1 MPas و یا برعکس خواهد بود.

نکته ۱: اگر ماده‌ای در فشار و دمای سیر شدن مایع باشد آن را مایع اشباع گوئیم.

نکته ۲: اگر ماده‌ای در فشار و دمای سیر شدن بخار باشد آن را بخار اشباع گوئیم.

نکته ۳: اگر دمای مایع در فشار موجود پایین‌تر از دمای اشباع باشد مایع متراکم است.

نکته ۴: اگر بخار در دمایی بیش از دمای اشباع باشد به آن بخار داغ یا سوپرهیت گوئیم.

نکته ۵: هرگاه در دمای اشباع بخشی از ماده مایع و بخشی دیگر بخار باشد حالت ماده را دو فازی گوئیم.

نقطه بحرانی: جایی که در آن مایع اشباع و بخار اشباع باهم معادلند و تغییر فاز قابل تشخیص نیست.

TABLE B.1
Thermodynamic Properties of Water

TABLE B.1.1
Saturated Water

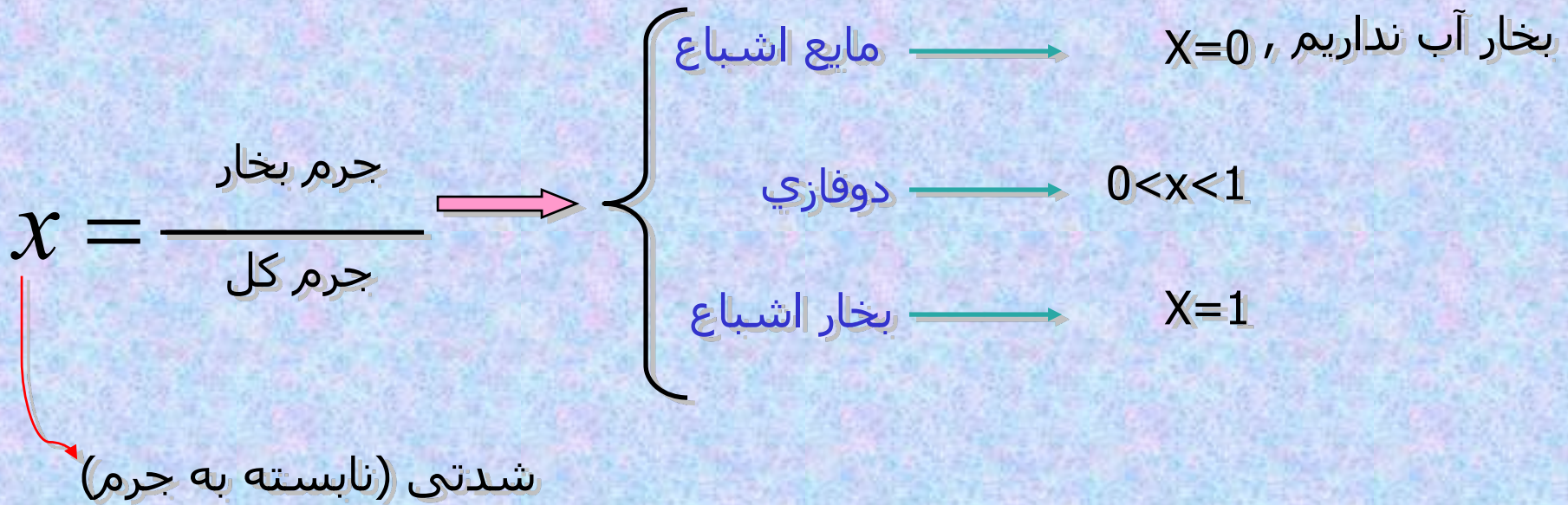
Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg		
		Sat. Liquid ν_f	Evap. ν_{fg}	Sat. Vapor ν_g
0.01	0.6113	0.001000	206.131	206.132
5	0.8721	0.001000	147.117	147.118
10	1.2276	0.001000	106.376	106.377
15	1.705	0.001001	77.924	77.925
20	2.339	0.001002	57.7887	57.7897
25	3.169	0.001003	43.3583	43.3593
30	4.246	0.001004	32.8922	32.8932
35	5.628	0.001006	25.2148	25.2158
40	7.384	0.001008	19.5219	19.5229
45	9.593	0.001010	15.2571	15.2581
50	12.350	0.001012	12.0308	12.0318
55	15.758	0.001015	9.56734	9.56835
60	19.941	0.001017	7.66969	7.67071
65	25.03	0.001020	6.19554	6.19656
70	31.19	0.001023	5.04114	5.04217
75	38.58	0.001026	4.13021	4.13123
80	47.39	0.001029	3.40612	3.40715
85	57.83	0.001032	2.82654	2.82757
90	70.14	0.001036	2.35953	2.36056
95	84.55	0.001040	1.98082	1.98186
100	101.3	0.001044	1.67185	1.67290

TABLE B.1.2
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m ³ /kg		
		Sat. Liquid ν_f	Evap. ν_{fg}	Sat. Vapor ν_g
0.6113	0.01	0.001000	206.131	206.132
1	6.98	0.001000	129.20702	129.20802
1.5	13.03	0.001001	87.97913	87.98013
2	17.50	0.001001	67.00285	67.00385
2.5	21.08	0.001002	54.25285	54.25385
3	24.08	0.001003	45.66402	45.66502
4	28.96	0.001004	34.79915	34.80015
5	32.88	0.001005	28.19150	28.19251
7.5	40.29	0.001008	19.23674	19.23775
10	45.81	0.001010	14.67254	14.67355
15	53.97	0.001014	10.02117	10.02218
20	60.06	0.001017	7.64835	7.64937
25	64.97	0.001020	6.20322	6.20424
30	69.10	0.001022	5.22816	5.22918
40	75.87	0.001026	3.99243	3.99345
50	81.33	0.001030	3.23931	3.24034
75	91.77	0.001037	2.21607	2.21711
100	99.62	0.001043	1.69296	1.69400
125	105.99	0.001048	1.37385	1.37490
150	111.37	0.001053	1.15828	1.15933
175	116.06	0.001057	1.00257	1.00363
200	120.23	0.001061	0.88467	0.88573
225	124.00	0.001064	0.79219	0.79325

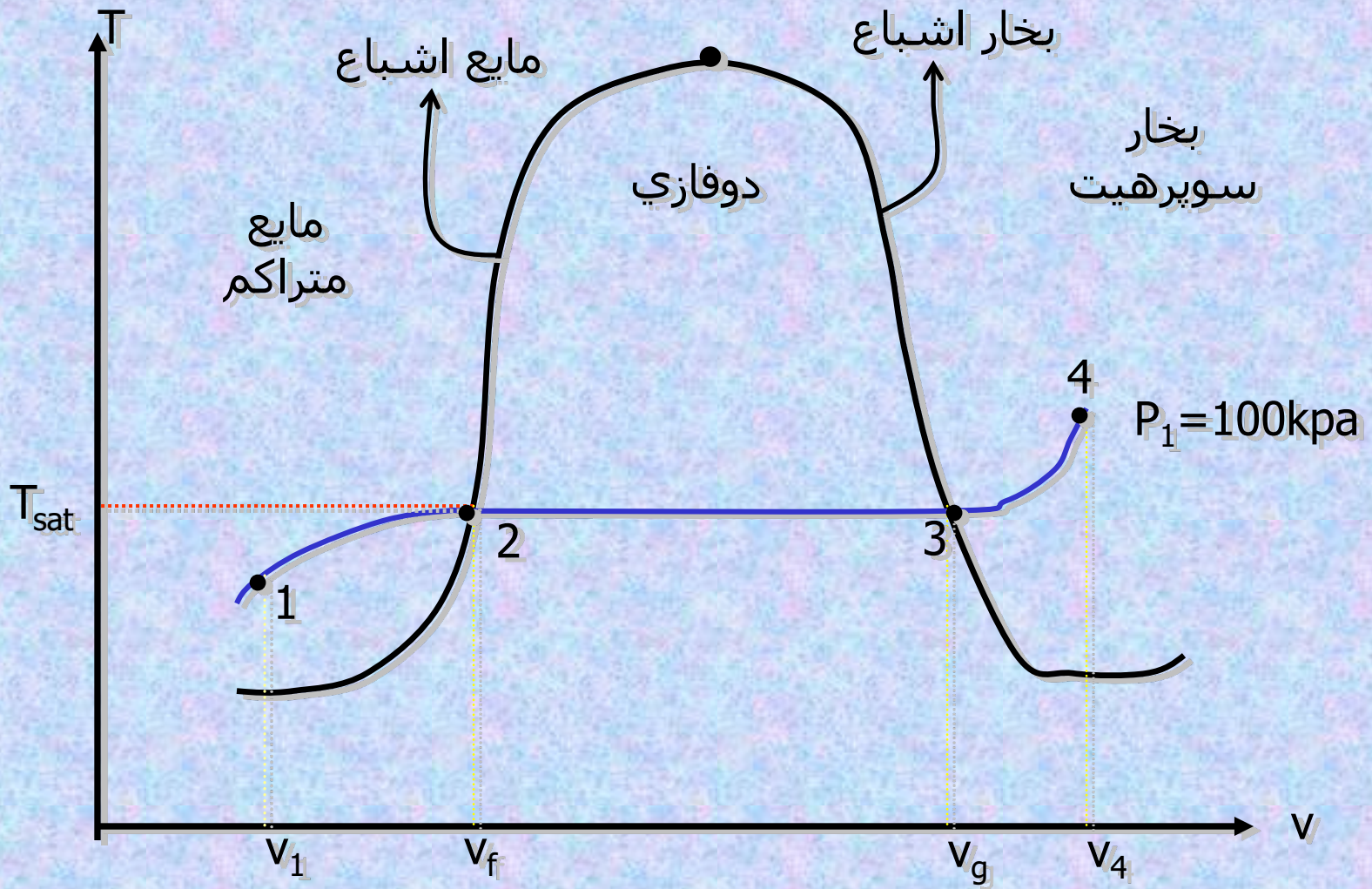
تعریف عیار یا کیفیت (quality):

نسبت جرم بخار به کل جرم يك ماده را عیار یا کیفیت آن ماده گویند و با x نمایش می‌دهند، عیار تنها هنگامی معنا دارد که ماده در حالت سیرشدن باشد.

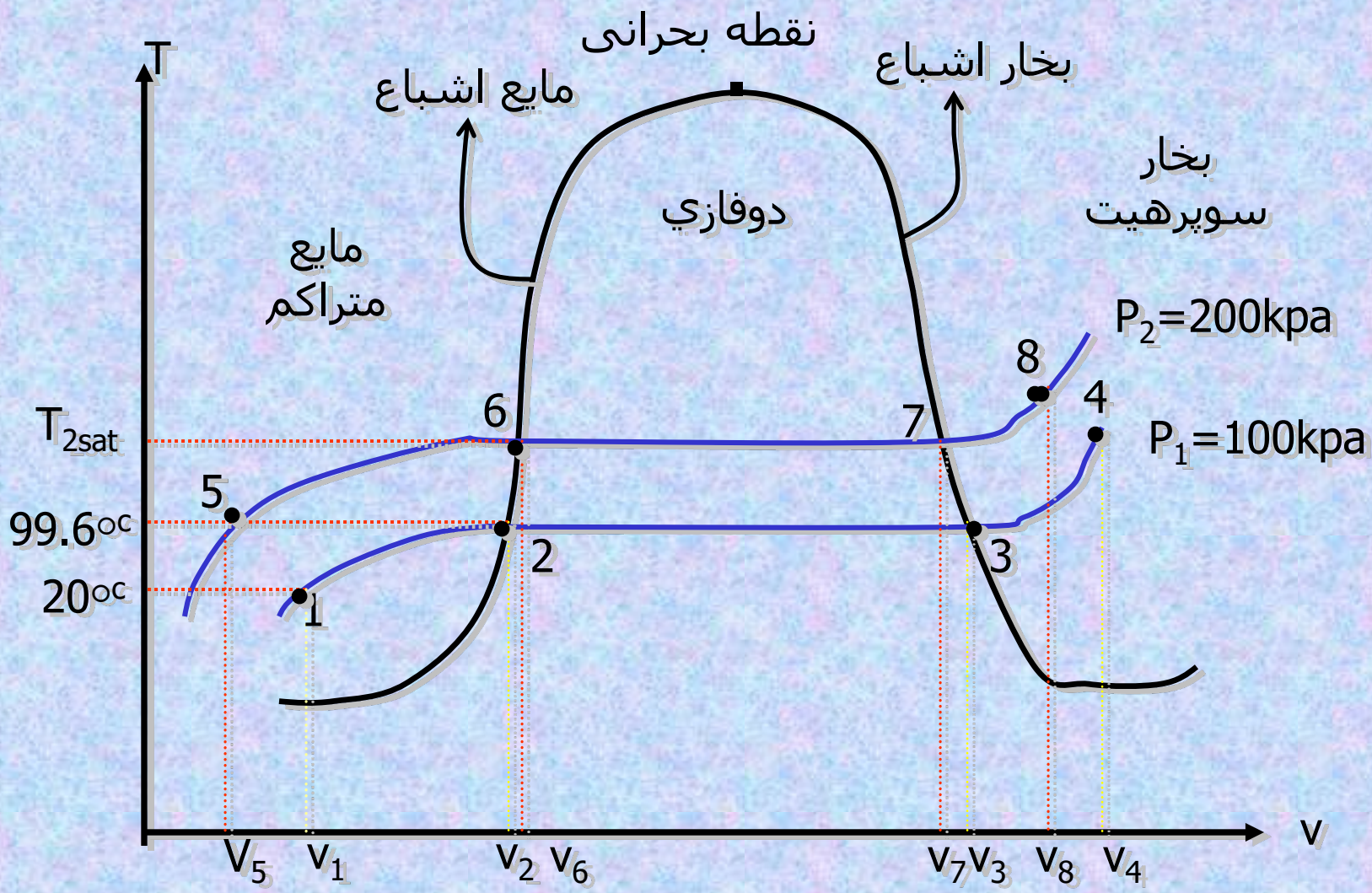


$$v = v_f + xv_{fg} \quad (\text{اثبات کنید})$$

نکته، در حالت دوفازی:



(دیاگرام دما - حجم)



$$P_2 > P_1$$

$$T_{sat2} > T_{sat1}$$

(دیاگرام دما - حجم)

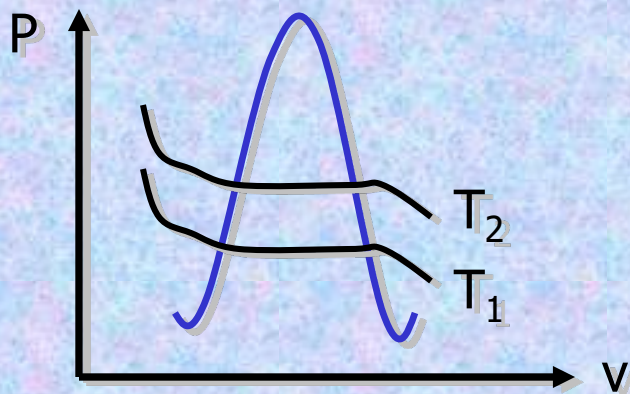
TABLE 2.2
Some Critical-Point Data

	Critical Temperature, °C	Critical Pressure, MPa	Critical Volume, m/kg
Water	374.14	22.09	0.003 155
Carbon dioxide	31.05	7.39	0.002 143
Oxygen	−118.35	5.08	0.002 438
Hydrogen	−239.85	1.30	0.032 192

* نمودار دما-حجم قبل برای فشار ثابت $p_1=100\text{Kpa}$ نشان داده شده است. نقطه 1 حالت متراکم را نشان می‌دهد و نقطه 2 مایع اشباع را مشخص می‌کند. خط 12 نشانگر فرایندی است که در آن دمای مایع افزایش یافته تا به دمای اشباع برسد نقطه 3 بخار اشباع و خط 23 فرایند دما ثابتی را نشان می‌دهد که طی آن ماده تغییر فاز داده و از مایع به بخار تبدیل می‌شود، خط 34 نشانگر فرایندی است که در آن بخار در فشاری ثابت گرم می‌شود و در جریان این فرایند دما افزایش می‌یابد تا بخار اشباع به بخار سوپرهیت تبدیل گردد.

* نمودار بالایی برای فشار ثابت $p_2 > p_1$ رسم شده است، نقطه 5 حالت اولیه برای این فشار را نشان می‌دهد که دمای آن همان دمای نقطه 1 است اما چون فشار نقطه 5 از فشار نقطه 1 بیشتر است در نتیجه حجم ویژه آن کوچکتر است. بقیه مراحل این نمودار مانند حالت قبل است از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که هر چه فشار افزایش یابد دمای اشباع آن نیز افزایش خواهد یافت.

نکته: نمودار فشار-حجم ویژه بصورت زیر مشخص می‌شود و خطوط دما ثابت بر روی آن طبق شکل زیر خواهد بود:



برای نمودار روبرو داریم: $T_1 < T_2$

TABLE B.1.3

Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
$P = 10 \text{ kPa (45.81}^\circ\text{C)}$				
Sat.	14.67355	2437.89	2584.63	8.1501
50	14.86920	2443.87	2592.56	8.1749
100	17.19561	2515.50	2687.46	8.4479
150	19.51251	2587.86	2782.99	8.6881
200	21.82507	2661.27	2879.52	8.9037
250	24.13559	2735.95	2977.31	9.1002
300	26.44508	2812.06	3076.51	9.2812
400	31.06252	2968.89	3279.51	9.6076
500	35.67896	3132.26	3489.05	9.8977
600	40.29488	3302.45	3705.40	10.1608
700	44.91052	3479.63	3928.73	10.4028
800	49.52599	3663.84	4159.10	10.6281
900	54.14137	3855.03	4396.44	10.8395
1000	58.75669	4053.01	4640.58	11.0392
1100	63.37198	4257.47	4891.19	11.2287
1200	67.98724	4467.91	5147.78	11.4090
1300	72.60250	4683.68	5409.70	14.5810

TABLE B.1.3

Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
$100 \text{ kPa (99.62}^\circ\text{C)}$				
Sat.	1.69400	2506.06	2675.46	7.3593
150	1.93636	2582.75	2776.38	7.6133
200	2.17226	2658.05	2875.27	7.8342
250	2.40604	2733.73	2974.33	8.0332
300	2.63876	2810.41	3074.28	8.2157
400	3.10263	2967.85	3278.11	8.5434
500	3.56547	3131.54	3488.09	8.8341
600	4.02781	3301.94	3704.72	9.0975
700	4.48986	3479.24	3928.23	9.3398
800	4.95174	3663.53	4158.71	9.5652
900	5.41353	3854.77	4396.12	9.7767
1000	5.87526	4052.78	4640.31	9.9764
1100	6.33696	4257.25	4890.95	10.1658
1200	6.79863	4467.70	5147.56	10.3462
1300	7.26030	4683.47	5409.49	10.5182
$300 \text{ kPa (133.55}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.60582	2543.55	2725.30	6.9918
150	0.63388	2570.79	2760.95	7.0778
200	0.71629	2650.65	2865.54	7.3115

TABLE B.1.3

Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
500 kPa (15 1.86°C)				
Sat.	0.37489	2561.23	2748.67	6.8212
200	0.42492	2642.91	2855.37	7.0592
250	0.47436	2723.50	2960.68	7.2708
300	0.52256	2802.91	3064.20	7.4598
350	0.57012	2882.59	3167.65	7.6328
400	0.61728	2963.19	3271.83	7.7937
500	0.71093	3128.35	3483.82	8.0872
600	0.80406	3299.64	3701.67	8.3521
700	0.89691	3477.52	3925.97	8.5952
800	0.98959	3662.17	4156.96	8.8211
900	1.08217	3853.63	4394.71	9.0329
1000	1.17469	4051.76	4639.11	9.2328
1100	1.26718	4256.29	4889.88	9.4224
1200	1.35964	4466.76	5146.58	9.6028
1300	1.45210	4682.52	5408.57	9.7749

TABLE B.1.3

Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
1200 kPa (187.99°C)				
Sat.	0.16333	2588.82	2784.82	6.5233
200	0.16930	2612.74	2815.90	6.5898
250	0.19235	2704.20	2935.01	6.8293
300	0.21382	2789.22	3045.80	7.0316
350	0.23452	2872.16	3153.59	7.2120
400	0.25480	2954.90	3260.66	7.3773
500	0.29463	3122.72	3476.28	7.6758
600	0.33393	3295.60	3696.32	7.9434
700	0.37294	3474.48	3922.01	8.1881
800	0.41177	3659.77	4153.90	8.4149
900	0.45051	3851.62	4392.23	8.6272
1000	0.48919	4049.98	4637.00	8.8274
1100	0.52783	4254.61	4888.02	9.0171
1200	0.56646	4465.12	5144.87	9.1977
1300	0.60507	4680.86	5406.95	9.3698

TABLE B.2

Thermodynamic Properties of Ammonia

TABLE B.2.1

Saturated Ammonia

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g
-50	40.9	0.001424	2.62557	2.62700
-45	54.5	0.001437	2.00489	2.00632
-40	71.7	0.001450	1.55111	1.55256
-35	93.2	0.001463	1.21466	1.21613
-30	119.5	0.001476	0.96192	0.96339
-25	151.6	0.001490	0.76970	0.77119
-20	190.2	0.001504	0.62184	0.62334
-15	236.3	0.001519	0.50686	0.50838
-10	290.9	0.001534	0.41655	0.41808
-5	354.9	0.001550	0.34493	0.34648
0	429.6	0.001566	0.28763	0.28920
5	515.9	0.001583	0.24140	0.24299
10	615.2	0.001600	0.20381	0.20541
15	728.6	0.001619	0.17300	0.17462
20	857.5	0.001638	0.14758	0.14922
25	1003.2	0.001658	0.12647	0.12813
30	1167.0	0.001680	0.10881	0.11049
35	1350.4	0.001702	0.09397	0.09567
40	1554.9	0.001725	0.08141	0.08313
45	1782.0	0.001750	0.07073	0.07248
50	2033.1	0.001777	0.06159	0.06337

TABLE B.2.2

Superheated Ammonia

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
50 kPa (−46.53°C)				
Sat.	2.1752	1269.6	1378.3	6.0839
−30	2.3448	1296.2	1413.4	6.2333
−20	2.4463	1312.3	1434.6	6.3187
−10	2.5471	1328.4	1455.7	6.4006
0	2.6474	1344.5	1476.9	6.4795
10	2.7472	1360.7	1498.1	6.5556
20	2.8466	1377.0	1519.3	6.6293
30	2.9458	1393.3	1540.6	6.7008
40	3.0447	1409.8	1562.0	6.7703
50	3.1435	1426.3	1583.5	6.8379
60	3.2421	1443.0	1605.1	6.9038
70	3.3406	1459.9	1626.9	6.9682
80	3.4390	1476.9	1648.8	7.0312
100	3.6355	1511.4	1693.2	7.1533
120	3.8318	1546.6	1738.2	7.2708
140	4.0280	1582.5	1783.9	7.3842
160	4.2240	1619.2	1830.4	7.4941
180	4.4199	1656.7	1877.7	7.6008
200	4.6157	1694.9	1925.7	7.7045

TABLE B.2.2 (continued)

Superheated Ammonia

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
800 kPa (17.85°C)				
Sat.	0.15958	1330.9	1458.6	5.1110
20	0.16138	1335.8	1464.9	5.1328
30	0.16947	1358.0	1493.5	5.2287
40	0.17720	1379.0	1520.8	5.3171
50	0.18465	1399.3	1547.0	5.3996
60	0.19189	1419.0	1572.5	5.4774
70	0.19896	1438.3	1597.5	5.5513
80	0.20590	1457.4	1622.1	5.6219
100	0.21949	1495.0	1670.6	5.7555
120	0.23280	1532.5	1718.7	5.8811
140	0.24590	1570.1	1766.9	6.0006
160	0.25886	1608.2	1815.3	6.1150
180	0.27170	1646.8	1864.2	6.2254
200	0.28445	1686.1	1913.6	6.3322
220	0.29712	1726.0	1963.7	6.4358
240	0.30973	1766.7	2014.5	6.5367
260	0.32228	1808.1	2065.9	6.6350
280	0.33477	1850.2	2118.0	6.7310
300	0.34722	1893.1	2170.9	6.8248

TABLE B.4

Thermodynamic Properties of R-410a

TABLE B.4.1

Saturated R-410a

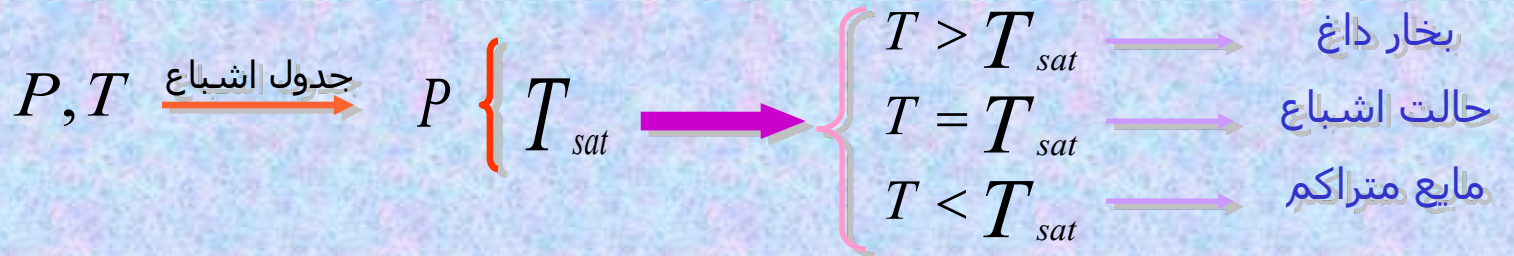
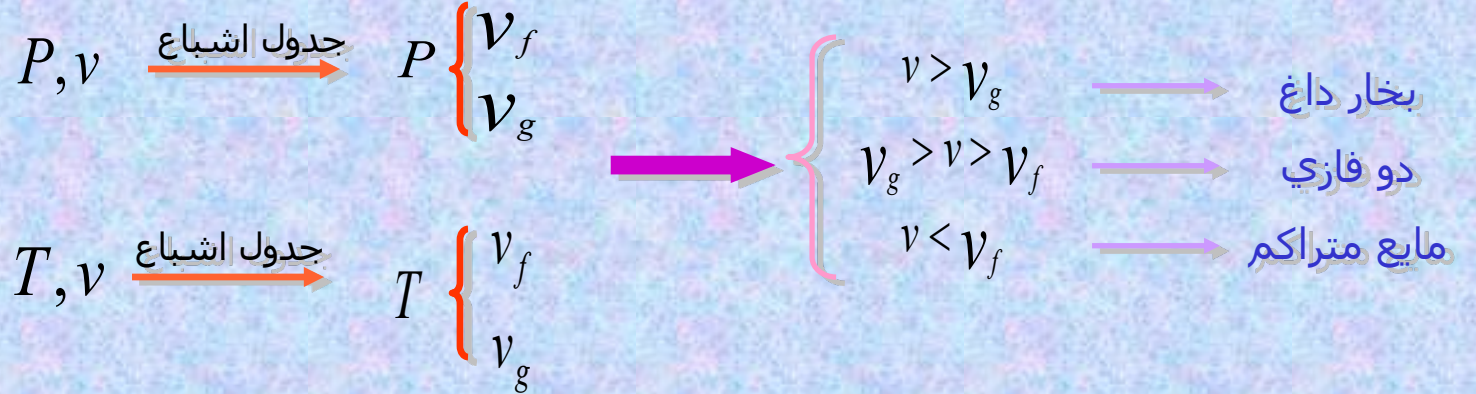
Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g
-60	64.1	0.000727	0.36772	0.36845
-55	84.0	0.000735	0.28484	0.28558
-51.4	101.3	0.000741	0.23875	0.23949
-50	108.7	0.000743	0.22344	0.22418
-45	138.8	0.000752	0.17729	0.17804
-40	175.0	0.000762	0.14215	0.14291
-35	218.4	0.000771	0.11505	0.11582
-30	269.6	0.000781	0.09392	0.09470
-25	329.7	0.000792	0.07726	0.07805
-20	399.6	0.000803	0.06400	0.06480
-15	480.4	0.000815	0.05334	0.05416
-10	573.1	0.000827	0.04470	0.04553
-5	678.9	0.000841	0.03764	0.03848
0	798.7	0.000855	0.03182	0.03267
5	933.9	0.000870	0.02699	0.02786
10	1085.7	0.000886	0.02295	0.02383
15	1255.4	0.000904	0.01955	0.02045
20	1444.2	0.000923	0.01666	0.01758
25	1653.6	0.000944	0.01420	0.01514
30	1885.1	0.000968	0.01208	0.01305
35	2140.2	0.000995	0.01025	0.01124

TABLE B.4.2 (continued)

Superheated R-410a

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
300 kPa (-27.37°C)				
Sat.	0.08548	243.08	268.72	1.0949
-20	0.08916	248.71	275.46	1.1219
0	0.09845	263.33	292.87	1.1881
20	0.10720	277.81	309.96	1.2485
40	0.11564	292.53	327.22	1.3054
60	0.12388	307.65	344.81	1.3599
80	0.13200	323.25	362.85	1.4125
100	0.14003	339.37	381.38	1.4635
120	0.14798	356.03	400.43	1.5132
140	0.15589	373.23	420.00	1.5617
160	0.16376	390.97	440.10	1.6093
180	0.17159	409.24	460.72	1.6558
200	0.17940	428.03	481.85	1.7014
220	0.18719	447.31	503.47	1.7462
240	0.19496	467.09	525.58	1.7901
260	0.20272	487.33	548.15	1.8332
280	0.21046	508.02	571.16	1.8756

تشخیص حالت سیستم:



Example 2.1

Determine the phase for each of the following water states using the tables in Appendix B and indicate the relative position in the P - v , T - v , and P - T diagrams.

- 120°C, 500 kPa
- 120°C, 0.5 m³/kg

Solution

- Enter Table B.1.1 with 120°C. The saturation pressure is 198.5 kPa, so we have a compressed liquid, point a in Fig. 2.11. That is above the saturation line for 120°C. We could also have entered Table B.1.2 with 500 kPa and found the saturation temperature as 151.86°C, so we would say that it is a subcooled liquid. That is to the left of the saturation line for 500 kPa, as seen in the P - T diagram.
- Enter Table B.1.1 with 120°C and notice that

$$v_f = 0.00106 < v < v_g = 0.89186 \text{ m}^3/\text{kg}$$

so the state is a two-phase mixture of liquid and vapor, point b in Fig. 2.11. The state is to the left of the saturated vapor state and to the right of the saturated liquid state, both seen in the T - v diagram.

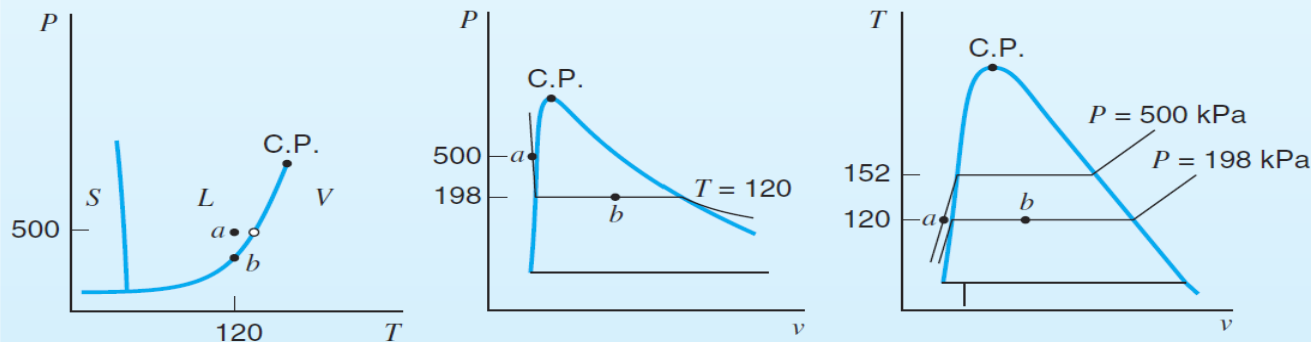


FIGURE 2.11 Diagram for Example 2.1.

Example 2.2

A closed vessel contains 0.1 m^3 of saturated liquid and 0.9 m^3 of saturated vapor R-134a in equilibrium at 30°C . Determine the percent vapor on a mass basis.

Solution

Values of the saturation properties for R-134a are found from Table B.5.1. The mass–volume relations then give

$$V_{\text{liq}} = m_{\text{liq}}v_f, \quad m_{\text{liq}} = \frac{0.1}{0.000843} = 118.6 \text{ kg}$$

$$V_{\text{vap}} = m_{\text{vap}}v_g, \quad m_{\text{vap}} = \frac{0.9}{0.02671} = 33.7 \text{ kg}$$

$$m = 152.3 \text{ kg}$$

$$x = \frac{m_{\text{vap}}}{m} = \frac{33.7}{152.3} = 0.221$$

That is, the vessel contains 90% vapor by volume but only 22.1% vapor by mass.