



## فصل ۱۶ - سیستم های دوفازی تک جزئی

Single component two-phase systems (vapor pressure)



## دیاگرام فازی (Phase diagram)

یک فاز به صورت حالت کاملاً یکنواخت و هموژن ماده گفته می‌شود. مثلاً آب مایع یک فاز بوده و یخ فاز دیگری خواهد بود.

دیاگرام فازی یک ماده خالص، نموداری از یک متغیر سیستم در مقابل متغیر دیگر و معرف شرایطی است که در آن ماده به صورت جامد، مایع و گاز وجود دارد.

معمولترین این دیاگرامها براساس محور عمودی فشار در مقابل محور افقی دما می‌باشد. مرزهای موجود بین نواحی تک فاز، فشارها و دماهایی را نشان می‌دهند که دو فاز همزمان وجود دارند. نواحی بین خطوط، نواحی تک فاز جامد، مایع و بخار هستند.

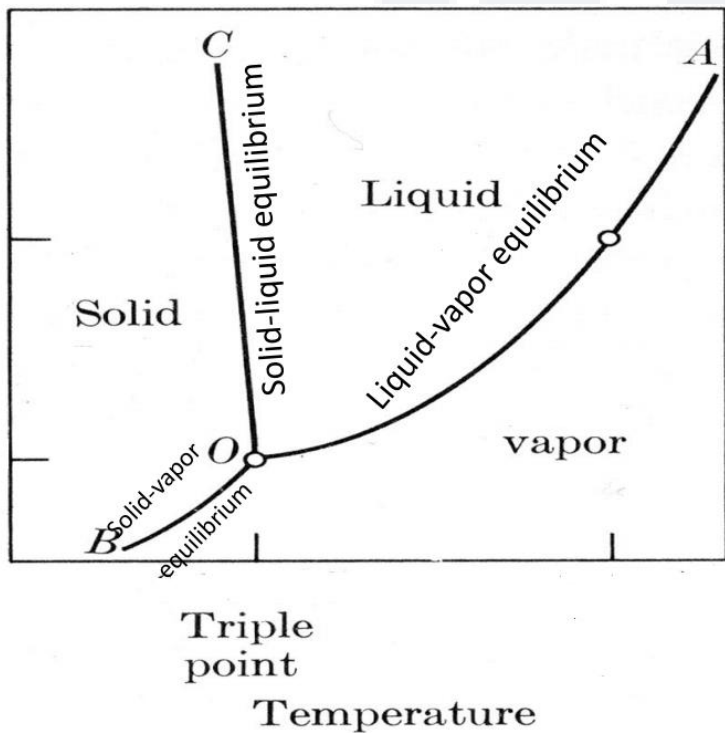
**منحنی تعادلی liquid-vapor:**  $P$  فشار بخار مایع در دمای  $T$  است و  $T$  نقطه جوش (boiling point) ماده در فشار  $P$  است.

**منحنی تعادلی solid-vapor:**  $P$  فشار بخار جامد در دمای  $T$  است و  $T$  نقطه تصعید (sublimation point) ماده در فشار  $P$  است.

**منحنی تعادلی solid-liquid:**  $T$  نقطه ذوب (melting point) یا نقطه انجماد (freezing point) در فشار  $P$  است.

**دمای بحرانی:** در مورد یک ماده خالص، بالاترین دمایی است که در آن مایع و بخار می‌توانند به حالت تعادل با یکدیگر وجود داشته باشند. حالت بحرانی، واسطه‌ای از شرایط فیزیکی خاصی است که تحت آنها دانسیته و سایر مشخصات مایع و بخار به صورت کاملاً یکسان در می‌آید.

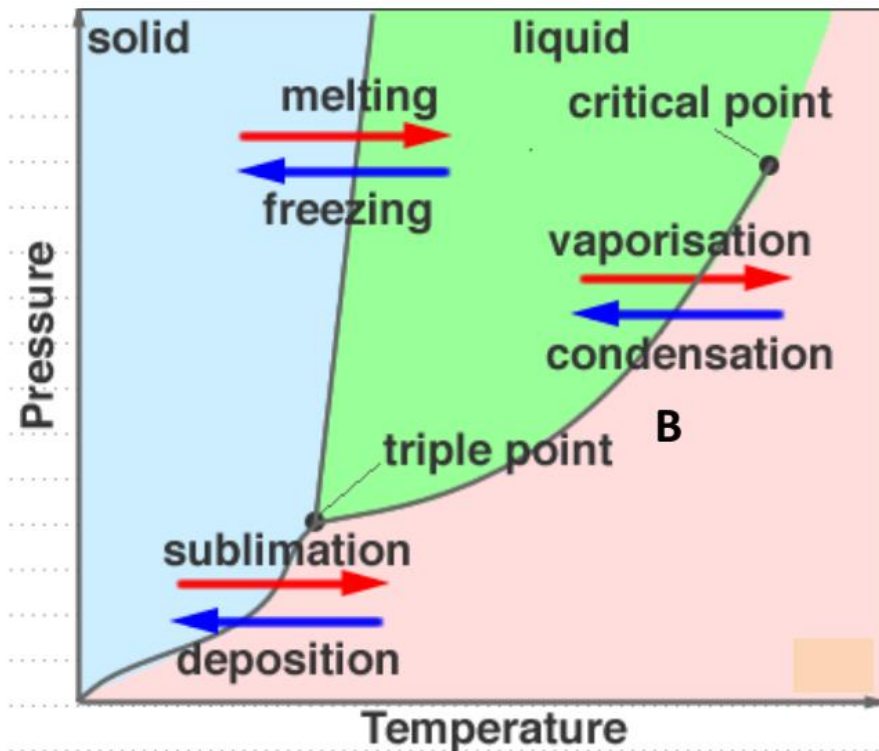
به گازی که دمای آن پایین‌تر از دمای بحرانی است، معمولاً بخار اطلاق می‌شود زیرا قابلیت میعان دارد.





**مایع اشباع/بخار اشباع:** اگر بخار و مایع یک ماده خالص در تعادل باشند، فشار تعادلی، فشار بخار نامیده می شود و با  $P^*$  نشان داده می شود. در یک دمای معین فقط یک فشار وجود دارد که فازهای مایع و بخار یک ماده خالص می توانند در تعادل باشند. مقادیر روی منحنی تعادلی مایع و بخار، دماها و فشارهای اشباع نامیده می شوند.

## دیاگرام فازی آب



**Boiling or vaporization or evaporation:** liquid  $\longrightarrow$  vapor

**Condensation:** vapor  $\longrightarrow$  liquid

**Freezing or solidifying:** liquid  $\longrightarrow$  solid

**Melting:** Solid  $\longrightarrow$  liquid

**Sublimation:** solid  $\longrightarrow$  vapor

**Deposition:** vapor  $\longrightarrow$  solid

**Triple point:** نقطه ای که سه فاز بخار، مایع و جامد می توانند در تعادل باشند



**نقطه حباب (Bubble point):** دمایی که مایع آغاز به تبخیر شدن می نماید.

**نقطه شبنم (Dew point):** دمایی که بخار شروع به میعان می کند.

هر ماده دارای بی نهایت نقطه جوش است ولی به طور معمول نقطه جوش نرمال را دمایی در نظر می گیرند که در آن عمل جوشش در فشار یک اتمسفر انجام می شود. نقطه جوش نرمال آب دمایی است که فشار بخار آب با فشار اتمسفر که بر سطح آب وارد می شود برابر گردد.

**نقطه جوش نرمال (Normal boiling point):** دمایی که مایع در فشار یک اتمسفر می جوشد.

**نقطه ذوب نرمال (Normal melting point):** دمایی که جامد در فشار یک اتمسفر ذوب می شود.

**ناحیه فوق بحرانی (Supercritical region):** مقادیر P-T برای مایع و بخار بالاتر از نقطه بحرانی

**بخار فوق داغ (Superheated vapor):** بخار در دمای بالاتر از دمای اشباع یا پایین تر از فشار اشباع

**مایع مادون سرد (Subcooled liquid):** مایع بین منحنی ذوب و منحنی بخار

**درجه داغی (degree of superheat):** در فشار ثابت، اختلاف دمای فوق داغ و دمای بخار اشباع را گویند.

**بخار مرطوب:** به مخلوط بخار و مایعی که در حالت تعادل باشند.

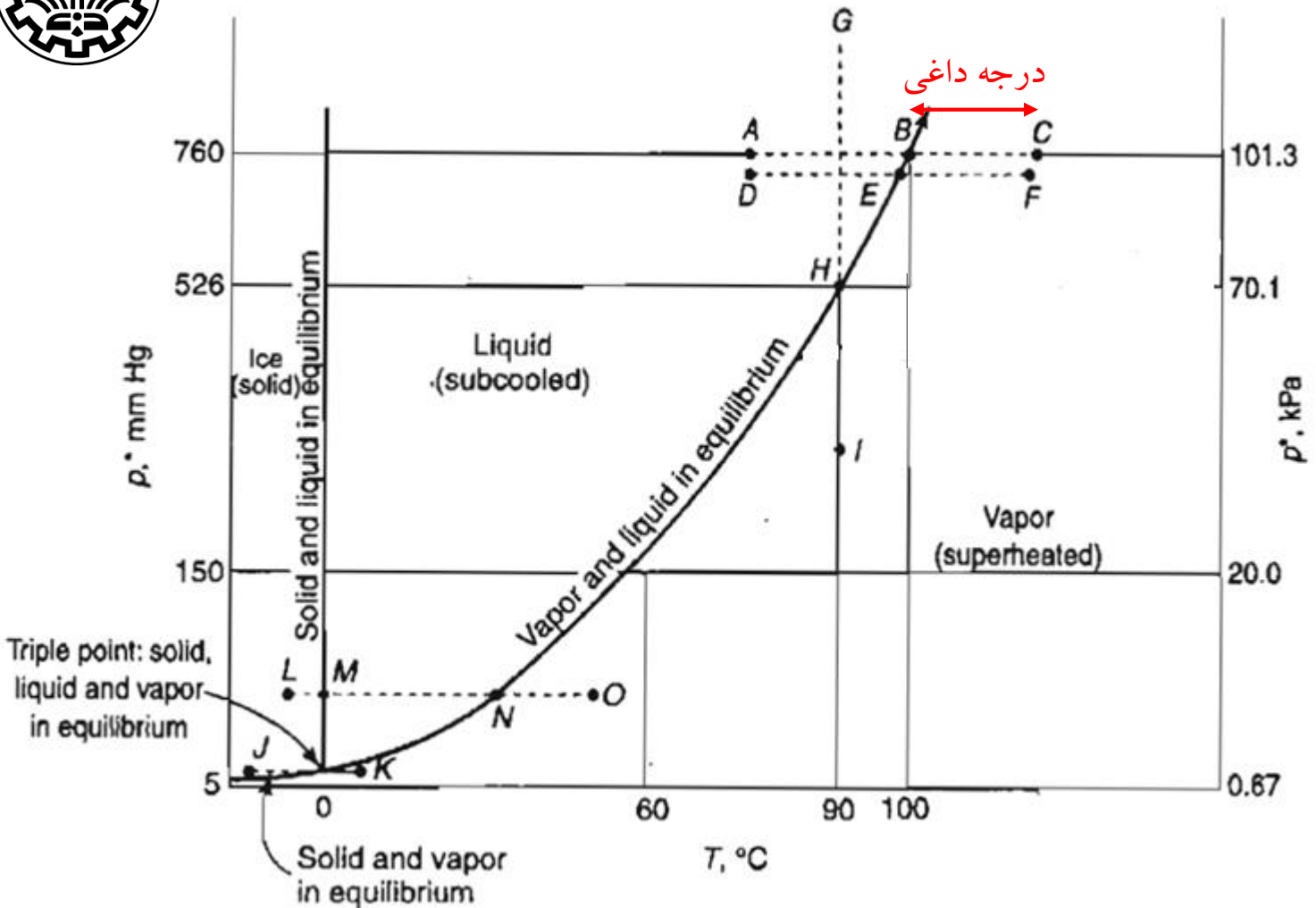
**کیفیت (Quality):** جزء جرمی بخار اشباع که در حالت تعادل با مایع اشباع می باشد. با X نشان می دهند.

$$\hat{V} = (1-x) \hat{V}_{\text{saturated liquid}} + x \hat{V}_{\text{saturated vapor}}$$



$T = cte, P > P^*$  : subcooled  
 $P = cte, T > T^*$  : superheated

نکته: در هر دمایی آب دارای فشاربخار معینی است.  
نکته: با افزایش دما، فشاربخار افزایش می یابد.



تبخیر و میعان در فشار ثابت 760 mmHg : مسیر A B C

A

70 °C

B

100 °C

C

101 °C

تبخیر و میعان در دمای ثابت: مسیر G H I

G

90 °C

H

90 °C

I

90 °C



## تخمین فشار بخار

تعیین فشار بخار در دمای معین یا دما در یک فشار بخار معین:

الف) معادلات  $P^*$  به صورت تابعی از  $T$

ب) جداول بخار (steam table)

ج) نمودار یا گراف های  $P^*$  بر حسب  $T$

### Appendix G , Table G.1

Table G.1 Antoine Equation Constants<sup>a</sup>

$$\log_{10} p^* = A - \frac{B}{T + C} \quad p^* \text{ in mm Hg, } T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Example: The vapor pressure of acetaldehyde at 25°C is determined as follows:

$$\log_{10} p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 8.00552 - \frac{1600.017}{25 + 291.809} = 2.9551$$

$$\Rightarrow p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 10^{2.9551} = 902 \text{ mm Hg}$$

Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Acetaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	-0.2 to 34.4	8.00552	1600.017	291.809
Acetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	29.8 to 126.5	7.38782	1533.313	222.309
Acetic acid*	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	0 to 36	7.18807	1416.7	225
Acetic anhydride	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	62.8 to 139.4	7.14948	1444.718	199.817
Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-12.9 to 55.3	7.11714	1210.595	229.664
Acrylic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	20.0 to 70.0	5.65204	648.629	154.683
Ammonia*	NH <sub>3</sub>	-83 to 60	7.55466	1002.711	247.885
Aniline	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	102.6 to 185.2	7.32010	1731.515	206.049
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	14.5 to 80.9	6.89272	1203.531	219.888

الف) معادله آنتوان (Antoine Equation)

$$\ln(p^*) = A - \frac{B}{C + T}$$

A, B, C constants



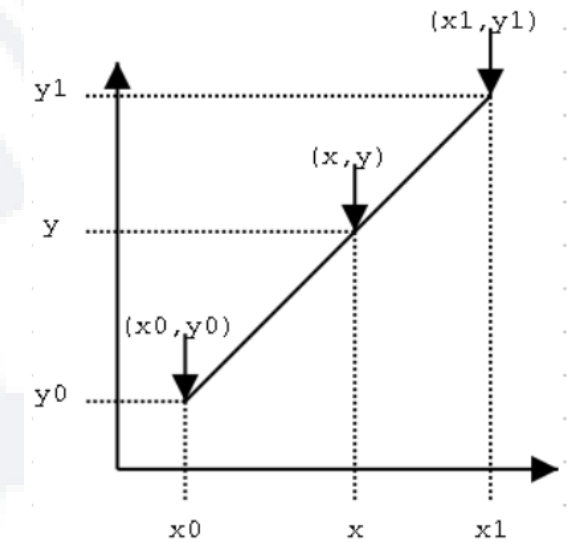


## (ب) جداول بخار (Steam Tables)

جدول بندی یا تنظیم جدول خواص آب و بخار (بخار آب) را جدول بخار می نامند.

Table 1. Saturated Steam: Temperature Table—Continued

Temp Fahr t	Abs Press. Lb per Sq In. p	Specific Volume			Enthalpy			Entropy			Temp Fahr t
		Sat. Liquid v <sub>f</sub>	Evap v <sub>fg</sub>	Sat. Vapor v <sub>g</sub>	Sat. Liquid h <sub>f</sub>	Evap h <sub>fg</sub>	Sat. Vapor h <sub>g</sub>	Sat. Liquid s <sub>f</sub>	Evap s <sub>fg</sub>	Sat. Vapor s <sub>g</sub>	
180.0	7.5110	0.016510	50.21	50.22	148.00	990.2	1138.2	0.2631	1.5480	1.8111	180.0
182.0	7.850	0.016522	48.172	48.189	150.01	989.0	1139.0	0.2662	1.5413	1.8075	182.0
184.0	8.203	0.016534	46.232	46.249	152.01	987.8	1139.8	0.2694	1.5346	1.8040	184.0
186.0	8.568	0.016547	44.383	44.400	154.02	986.5	1140.5	0.2725	1.5279	1.8004	186.0
188.0	8.947	0.016559	42.621	42.638	156.03	985.3	1141.3	0.2756	1.5213	1.7969	188.0
190.0	9.340	0.016572	40.941	40.957	158.04	984.1	1142.1	0.2787	1.5148	1.7934	190.0
192.0	9.747	0.016585	39.337	39.354	160.05	982.8	1142.9	0.2818	1.5082	1.7900	192.0
194.0	10.168	0.016598	37.808	37.824	162.05	981.6	1143.7	0.2848	1.5017	1.7865	194.0
196.0	10.605	0.016611	36.348	36.364	164.06	980.4	1144.4	0.2879	1.4952	1.7831	196.0
198.0	11.058	0.016624	34.954	34.970	166.08	979.1	1145.2	0.2910	1.4888	1.7798	198.0
200.0	11.526	0.016637	33.622	33.639	168.09	977.9	1146.0	0.2940	1.4824	1.7764	200.0
204.0	12.512	0.016664	31.135	31.151	172.11	975.4	1147.5	0.3001	1.4697	1.7698	204.0
208.0	13.568	0.016691	28.862	28.878	176.14	972.8	1149.0	0.3061	1.4571	1.7632	208.0
212.0	14.696	0.016719	26.782	26.799	180.17	970.3	1150.5	0.3121	1.4447	1.7568	212.0
216.0	15.901	0.016747	24.878	24.894	184.20	967.8	1152.0	0.3181	1.4323	1.7505	216.0
220.0	17.186	0.016775	23.131	23.148	188.23	965.2	1153.4	0.3241	1.4201	1.7442	220.0
224.0	18.556	0.016805	21.529	21.545	192.27	962.6	1154.9	0.3300	1.4081	1.7380	224.0
228.0	20.015	0.016834	20.056	20.073	196.31	960.0	1156.3	0.3359	1.3961	1.7320	228.0
232.0	21.567	0.016864	18.701	18.718	200.35	957.4	1157.8	0.3417	1.3842	1.7260	232.0
236.0	23.216	0.016895	17.454	17.471	204.40	954.8	1159.2	0.3476	1.3725	1.7201	236.0
240.0	24.968	0.016926	16.304	16.321	208.45	952.1	1160.6	0.3533	1.3609	1.7142	240.0
244.0	26.826	0.016958	15.243	15.260	212.50	949.5	1162.0	0.3591	1.3494	1.7085	244.0
248.0	28.796	0.016990	14.264	14.281	216.56	946.8	1163.4	0.3649	1.3379	1.7028	248.0
252.0	30.883	0.017022	13.358	13.375	220.62	944.1	1164.7	0.3706	1.3266	1.6972	252.0
256.0	33.091	0.017055	12.520	12.538	224.69	941.4	1166.1	0.3763	1.3154	1.6917	256.0
260.0	35.427	0.017089	11.745	11.762	228.76	938.6	1167.4	0.3819	1.3043	1.6862	260.0
264.0	37.894	0.017123	11.025	11.042	232.83	935.9	1168.7	0.3876	1.2933	1.6808	264.0
268.0	40.500	0.017157	10.358	10.375	236.91	933.1	1170.0	0.3932	1.2823	1.6755	268.0
272.0	43.249	0.017193	9.738	9.755	240.99	930.3	1171.3	0.3987	1.2715	1.6702	272.0
276.0	46.147	0.017228	9.162	9.180	245.08	927.5	1172.5	0.4043	1.2607	1.6650	276.0
280.0	49.200	0.017264	8.627	8.644	249.17	924.6	1173.8	0.4098	1.2501	1.6599	280.0
284.0	52.414	0.01730	8.1280	8.1453	253.3	921.7	1175.0	0.4154	1.2395	1.6548	284.0
288.0	55.795	0.01734	7.6634	7.6807	257.4	918.8	1176.2	0.4208	1.2290	1.6498	288.0
292.0	59.350	0.01738	7.2301	7.2475	261.5	915.9	1177.4	0.4263	1.2186	1.6449	292.0
296.0	63.084	0.01741	6.8259	6.8433	265.6	913.0	1178.6	0.4317	1.2082	1.6400	296.0



$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$



مثال) در 400 K و 245.6 kPa حجم ویژه بخار مرطوب  $0.505 \text{ m}^3/\text{kg}$  می باشد. کیفیت بخار را تعیین کنید.

$$\hat{V} = (1-x) \hat{V}_{\text{saturated liquid}} + x \hat{V}_{\text{saturated vapor}}$$

$$V_f = 0.001067 \text{ m}^3/\text{kg} \quad , \quad V_g = 0.7308 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$0.7308X + [0.001067(1-X)] = 0.505 \rightarrow X = 0.69$$

Properties of Saturated Water in SI Units

Press. kPa	T K	Volume, m <sup>3</sup> /kg	
		V <sub>f</sub>	V <sub>g</sub>
0.80	276.92	0.001000	159.7
1.0	280.13	0.001000	129.2
1.2	282.81	0.001000	108.7
1.4	285.13	0.001001	93.92
1.6	287.17	0.001001	82.76
1.8	288.99	0.001001	74.03
2.0	290.65	0.001002	67.00
2.5	294.23	0.001002	54.25
3.0	297.23	0.001003	45.67
4.0	302.12	0.001004	34.80

Properties of Saturated Water in SI Units

T K	Press. kPa	Volume, m <sup>3</sup> /kg	
		$\hat{V}_f$	$\hat{V}_g$
273.16	0.6113	0.001000	206.1
275	0.6980	0.001000	181.7
280	0.9912	0.001000	130.3
285	1.388	0.001001	94.67
290	1.919	0.001001	69.67
295	2.620	0.001002	51.90
300	3.536	0.001004	39.10
305	4.718	0.001005	29.78
310	6.230	0.001007	22.91
315	8.143	0.001009	17.80





Table C.1cSI Superheated Vapor Table for Steam in SI Units

P=0.01 MPa					P=0.05 MPa					P=0.1 MPa				
T	v	h	u	s	T	v	h	u	s	T	v	h	u	s
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
45.84	14.6711	2585.00	2438.29	8.1510	81.35	3.2403	2645.91	2483.90	7.5939	99.63	1.6937	2675.27	2505.90	7.3589
50	14.8674	2592.98	2444.31	8.1759										
100	17.1975	2688.13	2516.16	8.4497	100	3.4187	2682.94	2512.00	7.6959	100	1.6956	2676.01	2506.45	7.3610
150	19.5146	2783.36	2588.21	8.6891	150	3.8901	2780.49	2585.99	7.9412	150	1.9369	2776.81	2583.13	7.6146
200	21.8271	2879.50	2661.23	8.9039	200	4.3566	2877.68	2659.85	8.1583	200	2.1727	2875.37	2658.10	7.8347
250	24.1377	2976.88	2735.50	9.0995	250	4.8211	2975.61	2734.56	8.3550	250	2.4064	2974.01	2733.36	8.0329
300	26.4473	3075.66	2811.18	9.2798	300	5.2845	3074.71	2810.49	8.5359	300	2.6391	3073.52	2809.61	8.2146
350	28.7562	3175.93	2888.37	9.4475	350	5.7473	3175.19	2887.83	8.7040	350	2.8712	3174.27	2887.15	8.3831
400	31.0649	3277.76	2967.11	9.6047	400	6.2097	3277.17	2966.68	8.8614	400	3.1029	3276.43	2966.14	8.5407
450	33.3733	3381.21	3047.48	9.7529	450	6.6720	3380.72	3047.12	9.0097	450	3.3343	3380.11	3046.68	8.6893
500	35.6815	3486.32	3129.50	9.8934	500	7.1341	3485.90	3129.20	9.1504	500	3.5657	3485.38	3128.82	8.8300

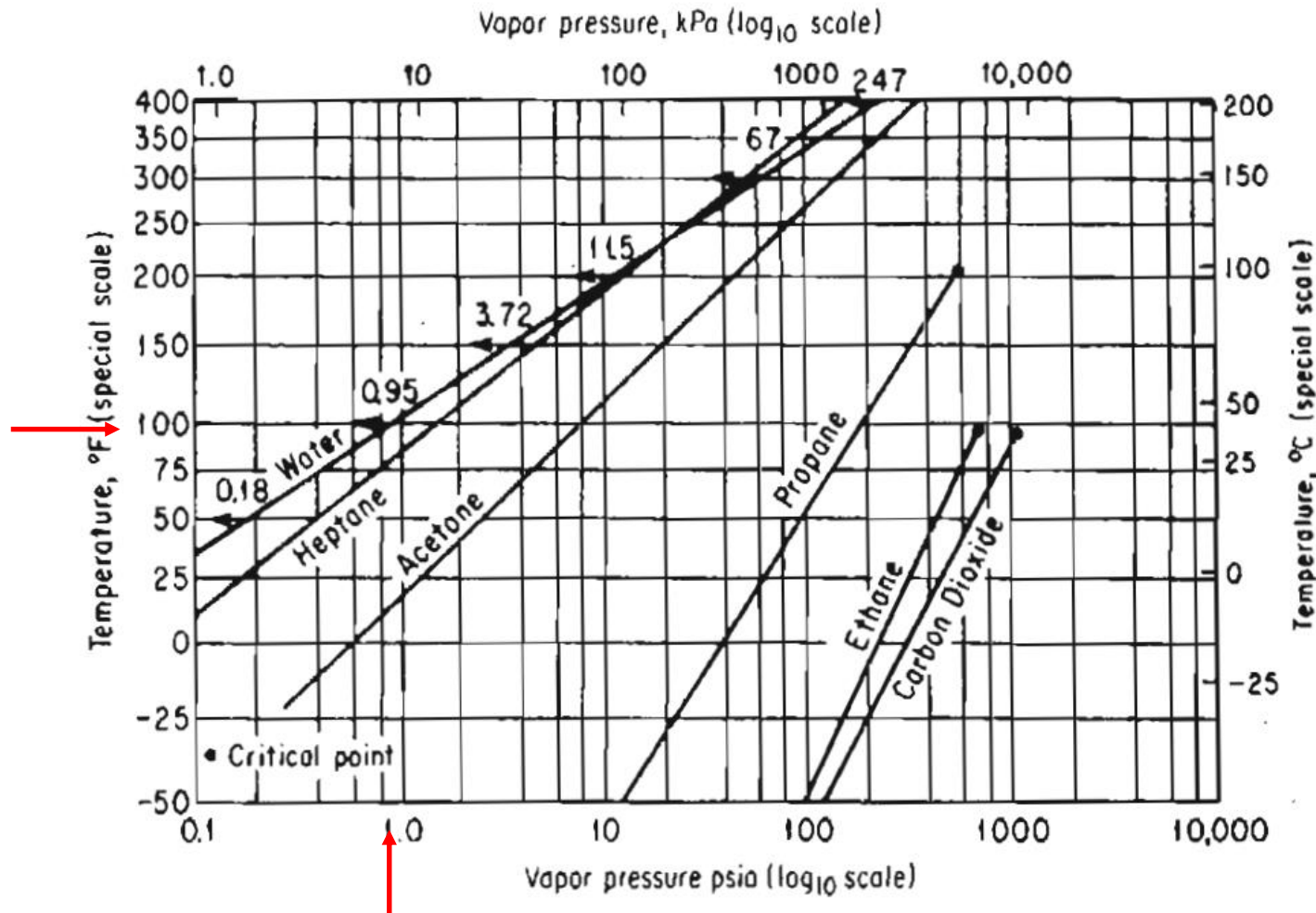
Table C.1dSI Compressed Liquid Table for Steam in SI Units

P=5 MPa					P=10 MPa					P=15 MPa				
T	v	h	u	s	T	v	h	u	s	T	v	h	u	s
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
0	0.000995	5.91	0.94	-0.0057	0	0.000995	10.85	0.91	-0.0100	0	0.000995	15.72	0.80	-0.0143
20	0.001000	88.93	83.93	0.2919	20	0.001000	93.59	83.59	0.2873	20	0.001000	98.20	83.20	0.2828
40	0.001008	171.90	166.86	0.5671	40	0.001008	176.32	166.24	0.5623	40	0.001008	180.69	165.57	0.5576
60	0.001017	255.11	250.02	0.8251	60	0.001017	259.29	249.12	0.8201	60	0.001017	263.45	248.19	0.8151
80	0.001029	338.63	333.49	1.0689	80	0.001029	342.60	332.31	1.0636	80	0.001029	346.55	331.12	1.0583
100	0.001043	422.52	417.30	1.3003	100	0.001043	426.27	415.84	1.2946	100	0.001043	430.03	414.38	1.2890
120	0.001060	506.87	501.57	1.5208	120	0.001060	510.40	499.80	1.5147	120	0.001060	513.94	498.04	1.5086
140	0.001080	591.85	586.45	1.7316	140	0.001080	595.13	584.33	1.7250	140	0.001080	598.43	582.23	1.7185
160	0.001102	677.72	672.20	1.9342	160	0.001102	680.69	669.67	1.9270	160	0.001102	683.71	667.17	1.9200
180	0.001128	764.80	759.16	2.1299	180	0.001128	767.39	756.11	2.1220	180	0.001128	770.03	753.12	2.1143
200	0.001156	853.48	847.69	2.3200	200	0.001156	855.56	844.00	2.3113	200	0.001156	857.73	840.39	2.3028



## ج) استفاده از نمودارها و گرافها (Plots)

نتایج تجربی حاکی از آن است که مقادیر دما و فشاربخار تابع خطی نبوده و به حالت منحنی میل می کنند. این انحنا را می توان با استفاده از منحنی خاصی به نام نمودار کاکس (Cox chart) خطی کرد.



محور فشار لگاریتمی است.  
محور دما دارای مقیاس غیرخطی است.

$$\log x = a$$

$$x = 10^a$$