



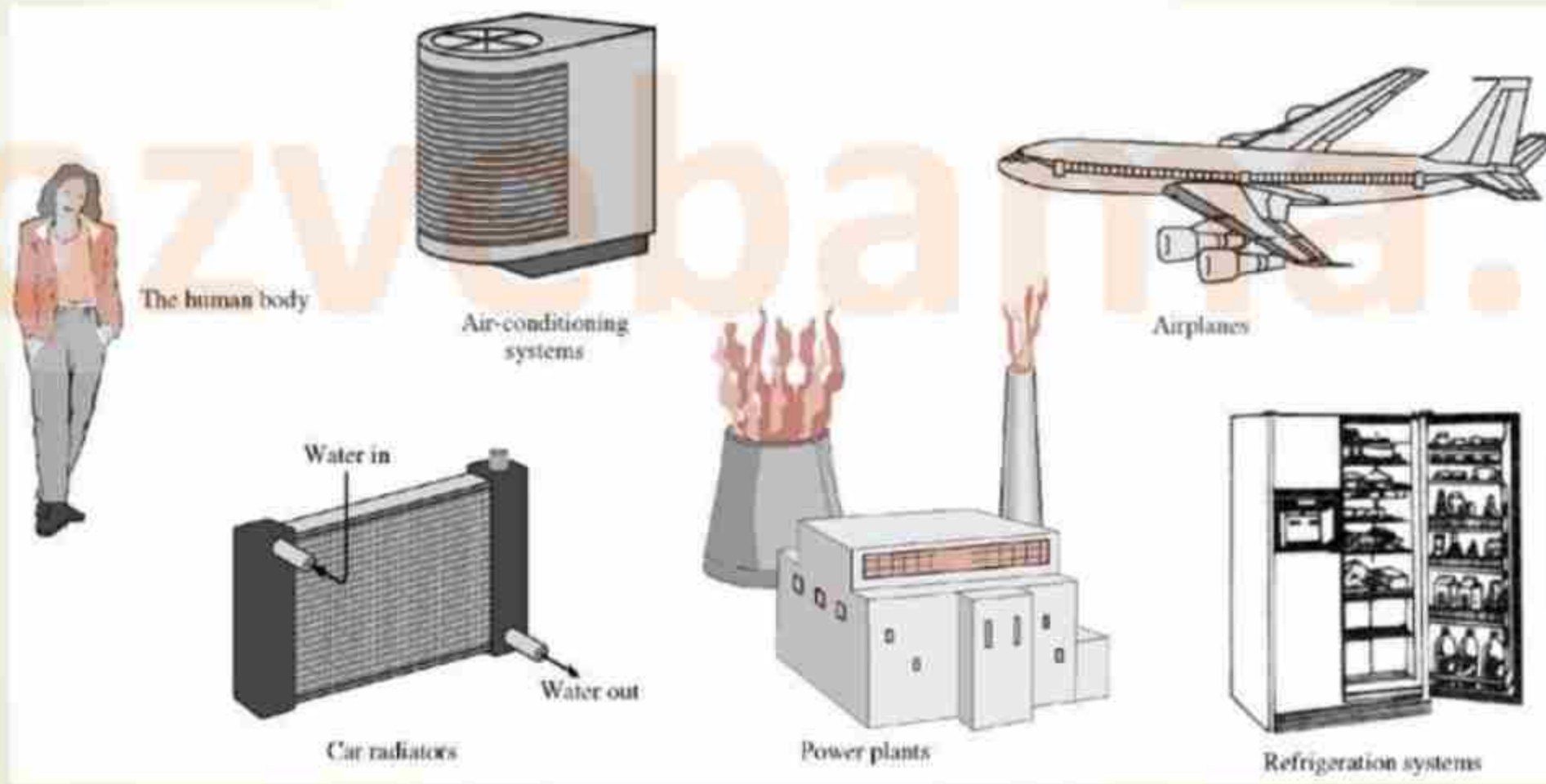
جزوه باما

دانشجویان و اساتید توجه داشته باشید جزوه موجود به صورت اختصاصی توسط وب سایت **جزوه باما** تهیه شده است و تمامی حقوق مادی و معنوی آن برای این وب سایت محفوظ می باشد.

Jozvebama.ir

فصل اول: مفاهیم اصلی و تعاریف

مفهوم **ترمودینامیک**: از دو کلمه یونانی thermo به معنای حرارت و dynamic به معنای قدرت گرفته شده است.



کاربردها

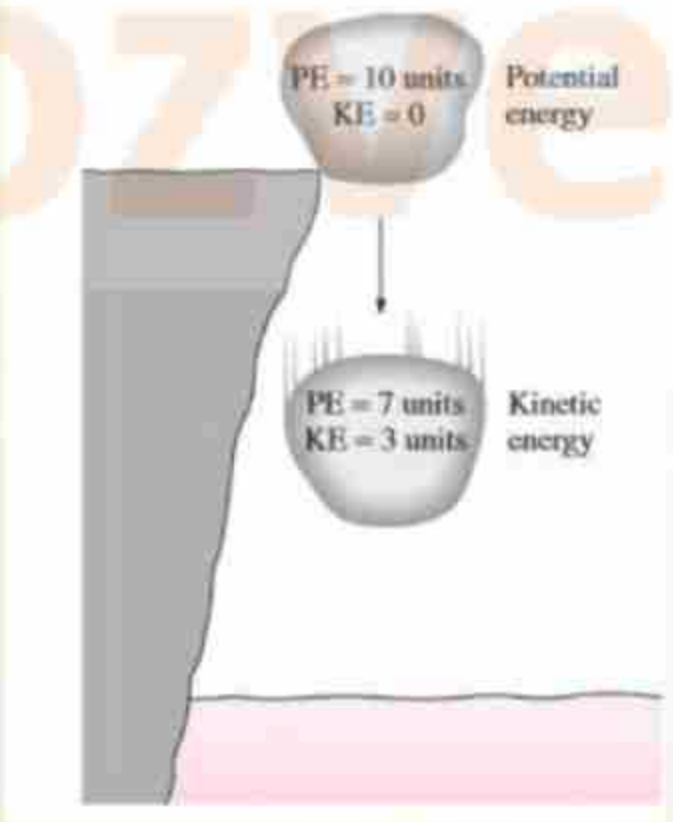
دیدگاه
ماکروسکوپی

ترمودینامیک
کلاسیک

ترمودینامیک

دیدگاه
میکروسکوپی

ترمودینامیک
آماري



انرژی

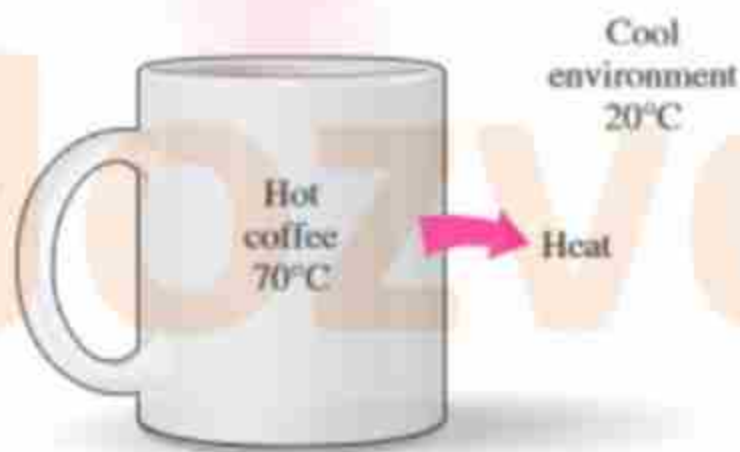
اصل بقای انرژی

قانون اول ترمودینامیک:

بیانی از اصل بقای انرژی است. این قانون بیان می‌دارد که انرژی نه از بین می‌رود و نه بوجود می‌آید بلکه از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌شود. (انرژی یک خاصیت ترمودینامیکی است).

قانون دوم ترمودینامیک:

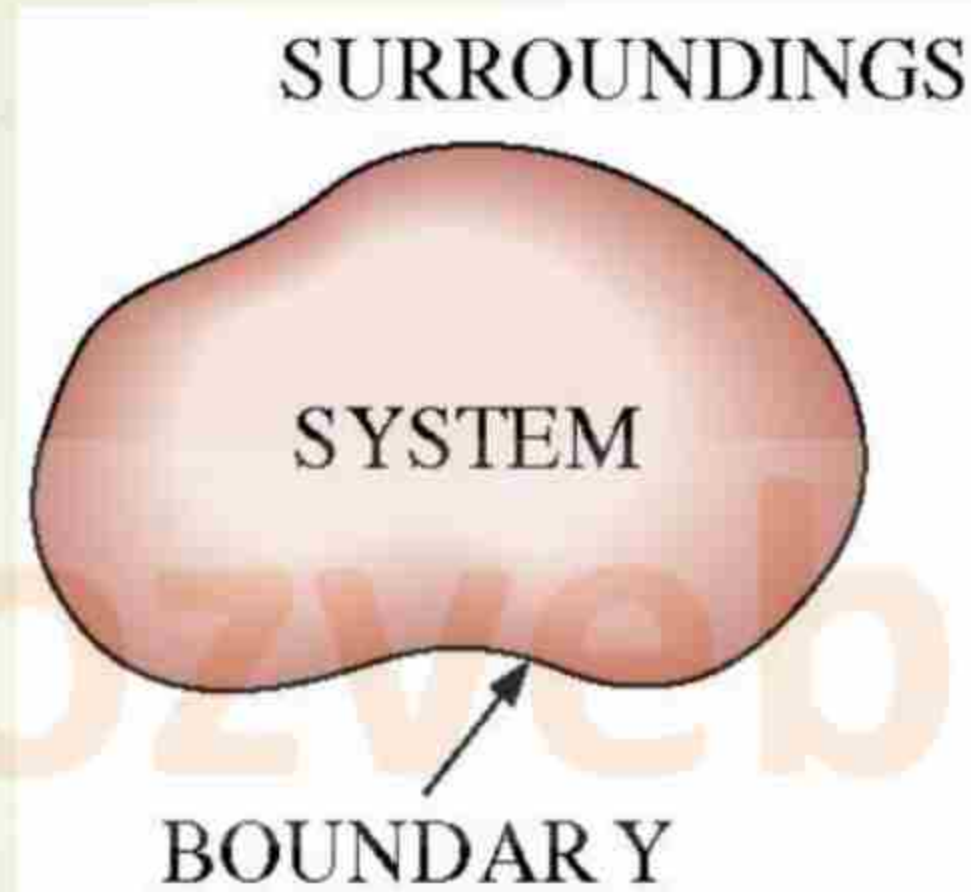
بیان می‌دارد که انرژی هم دارای کیفیت و هم دارای کمیت می‌باشد و فرایندهای واقعی در جهت کاهش کیفیت انرژی خود به وقوع می‌پیوندند.



قانون سوم ترمودینامیک:

هیچ وقت نمی‌توانیم به صفر مطلق برسیم بلکه می‌توانیم به آن نزدیک شویم.

سیستم و حجم کنترل



سیستم (SYSTEM)

محیط (SURROUNDINGS)

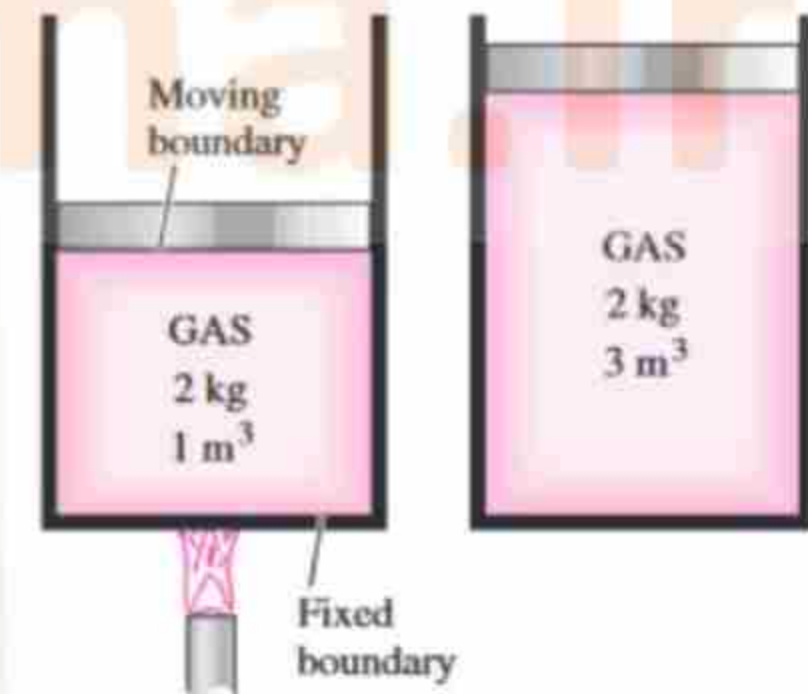
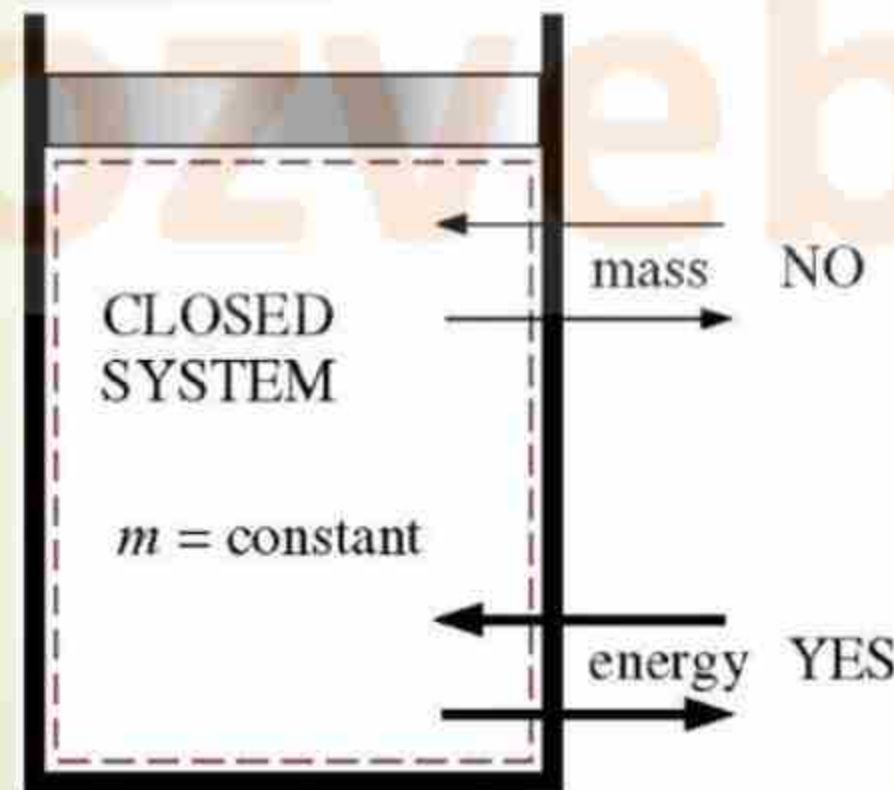
مرز سیستم (BOUNDARY)

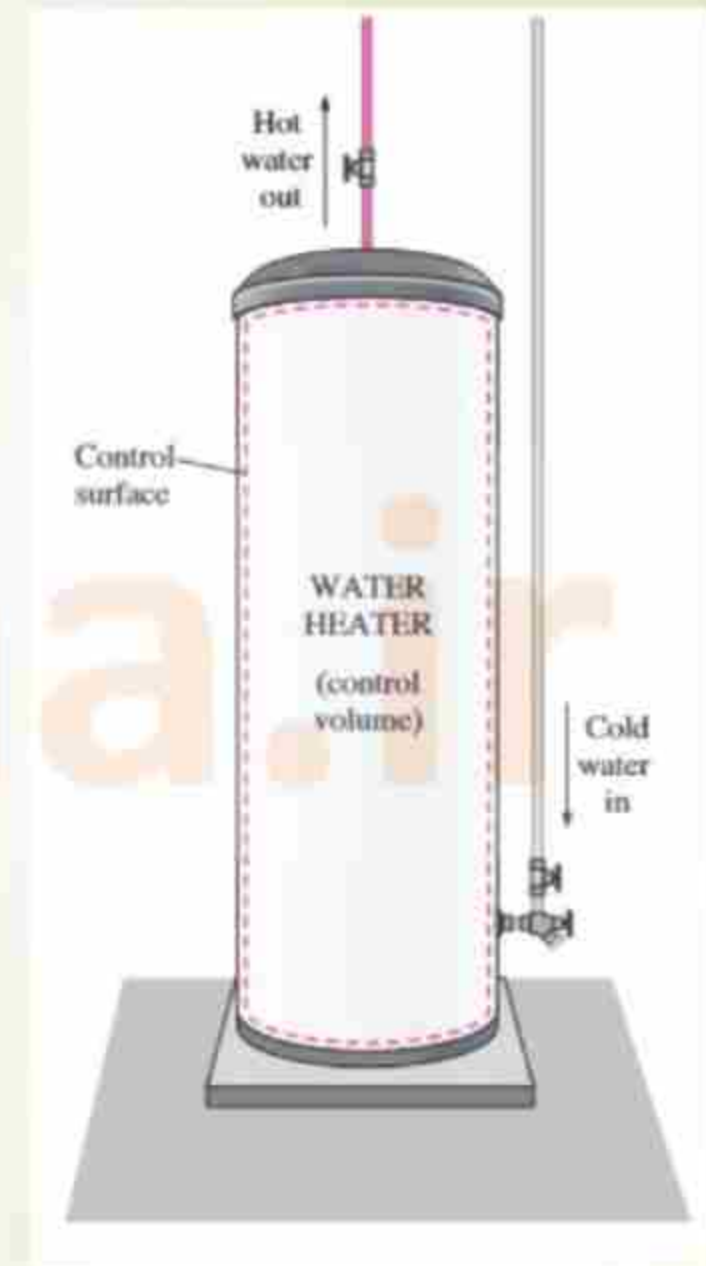
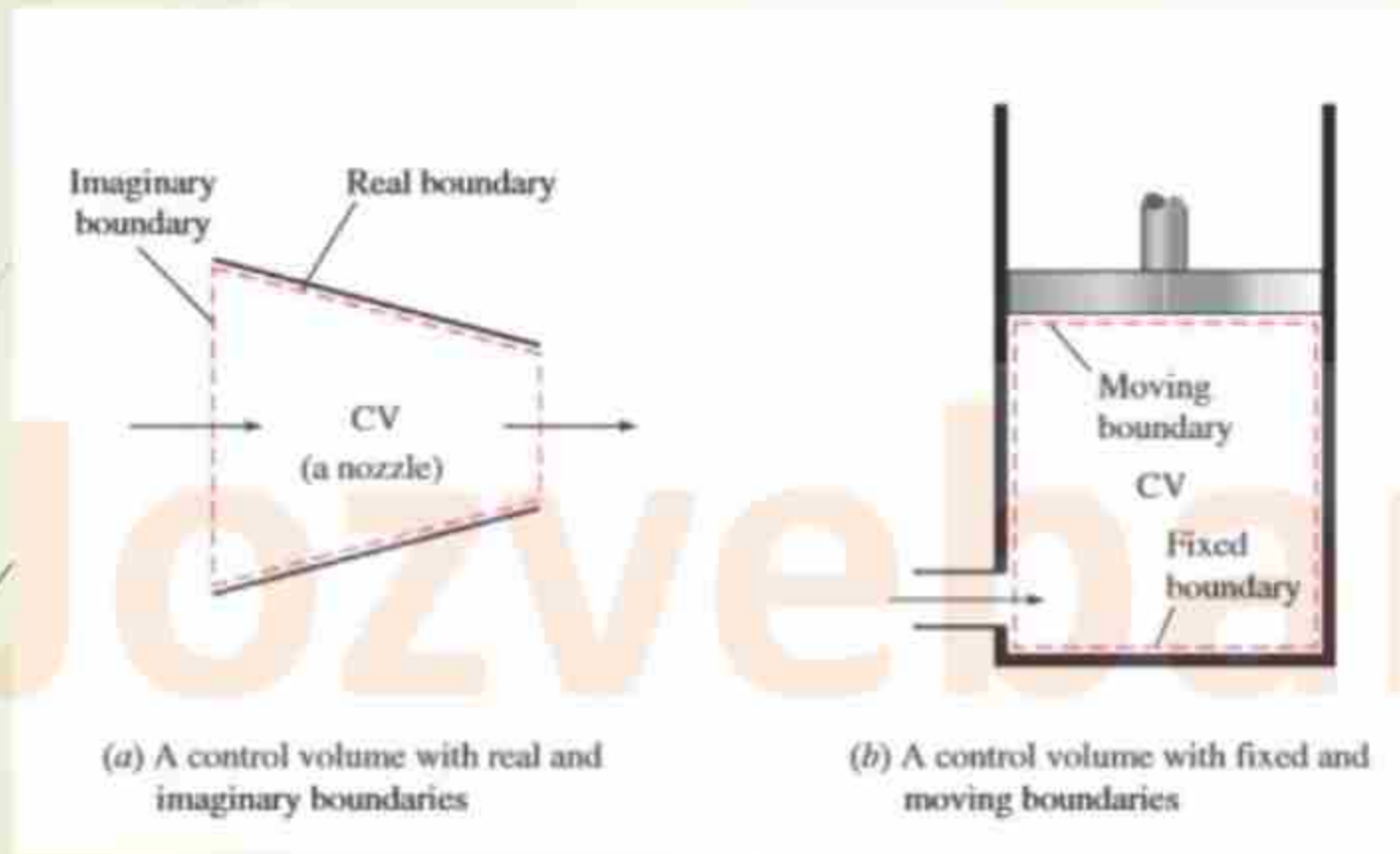
مرز واقعی یا فرضی که سیستم را از محیط جدا می کند
مرز سیستم می نامند. مرز سیستم می تواند ثابت و یا
متحرک باشد. توجه داشته باشید که مرز مربوط به
سطح مشترک بین سیستم و محیط اطراف می باشد. به
بیان ریاضی ضخامت این مرز صفر است و بنابراین
نمی تواند جرمی را در بر داشته باشد یا فضای را اشغال
نماید.

انواع سیستم

نکته: روابط ترمودینامیکی که برای سیستم های باز و بسته به کار می روند با هم تفاوت دارند بنابراین بسیار اهمیت دارد قبل از اینکه به تحلیل سیستم پردازیم ، نوع سیستم را از ابتدا مشخص کنیم.

سیستم بسته





اشکال انرژی:

انرژی می تواند به اشکال مختلفی از قبیل حرارتی، مکانیکی، جنبشی، پتانسیل، الکتریکی، مغناطیسی، شیمیایی و هسته ای وجود داشته باشد. که مجموعشان انرژی کل (E) یک سیستم نامیده می شود. انرژی بر واحد جرم یک سیستم را e نشان داده و به صورت زیر تعریف می گردد.

$$e = \frac{E}{m} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad \text{per unit mass}$$

$$KE = \frac{m V^2}{2} \quad (kJ)$$

$$Ke = \frac{V^2}{2} \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$PE = mgz \quad (kJ)$$

per unit mass

$$Pe = gz \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$E = U + KE + PE = U + \frac{m V^2}{2} + m.g.z \quad (kJ)$$

per unit mass :

$$e = u + Ke + Pe = u + \frac{V^2}{2} + g.z \quad (kJ)$$

خواص و حالت ماده

خواص مهم ترمودینامیکی:

هر مشخصه از سیستم یک خاصیت نامیده می شود.

فشار (P)، دما (T)، حجم (V)، جرم (m)

حالت ماده: حالت ماده توسط خواص آن تعیین می شود، پس یکی از این خاصیت ها تغییر کند حالت ماده هم تغییر می کند.

خواص مقداری (گسترده): متناسب با جرم سیستم (جرم، حجم، انرژی،)

خواص

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

خواص شدتی (متمرکز): مستقل از جرم سیستم (دما، فشار، چگالی، حجم مخصوص)

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

$$e = \frac{E}{m}, v = \frac{V}{m}, u = \frac{U}{m}$$

خواص مخصوص: خواص مقداری بر واحد جرم (تبدیل خواص مقداری به شدتی)

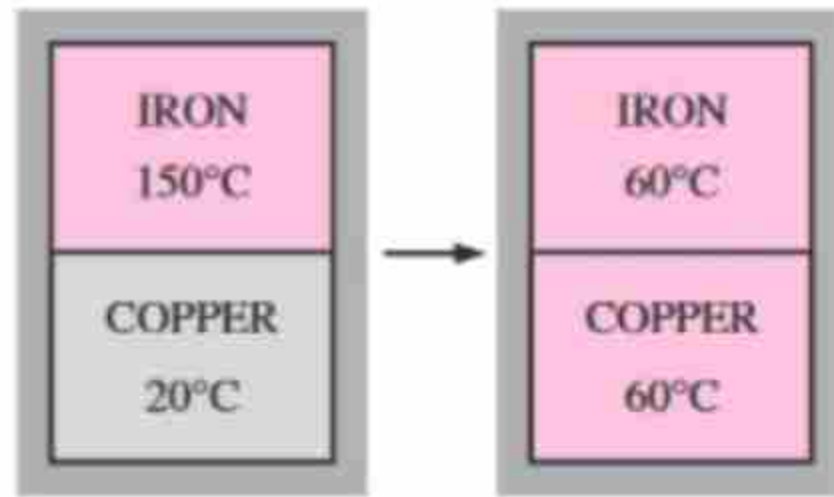
انواع تعادل

(۱) تعادل حرارتی

(۲) تعادل مکانیکی

(۳) تعادل شیمیایی

(۴) تعادل فازی

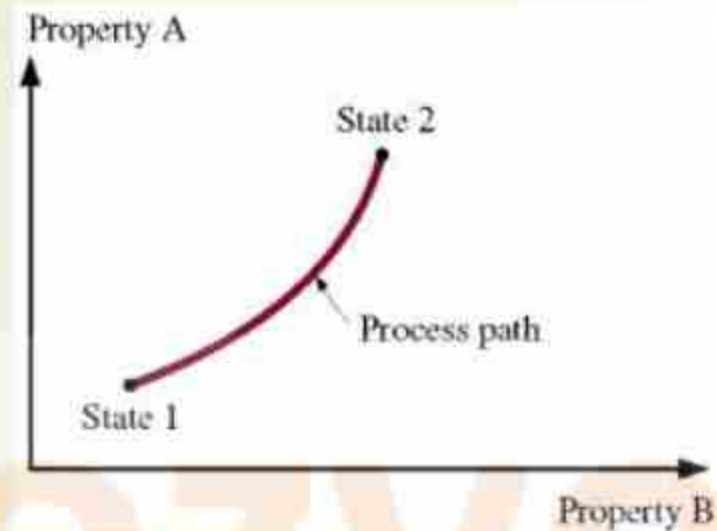


تعادل ترمودینامیکی ← دمایکنواخت، فشاردر همه جا یکسان

Jozvebama.ir

فرآیند (PROCESSES)

هر تغییری که یک سیستم را از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر برساند، فرآیند نامیده می شود.



فرآیند دما ثابت (فرآیند ایزوترم)

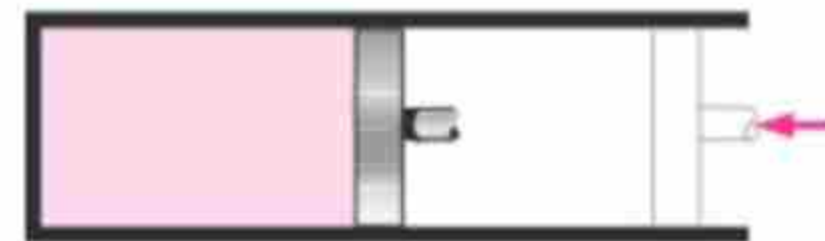
فرآیند فشار ثابت (فرآیند ایزوبار)

فرآیند حجم ثابت (فرآیند ایزوکور یا ایزومتریک)

فرآیند شبه تعادلی و غیر تعادلی



(a) Slow compression
(quasi-equilibrium)



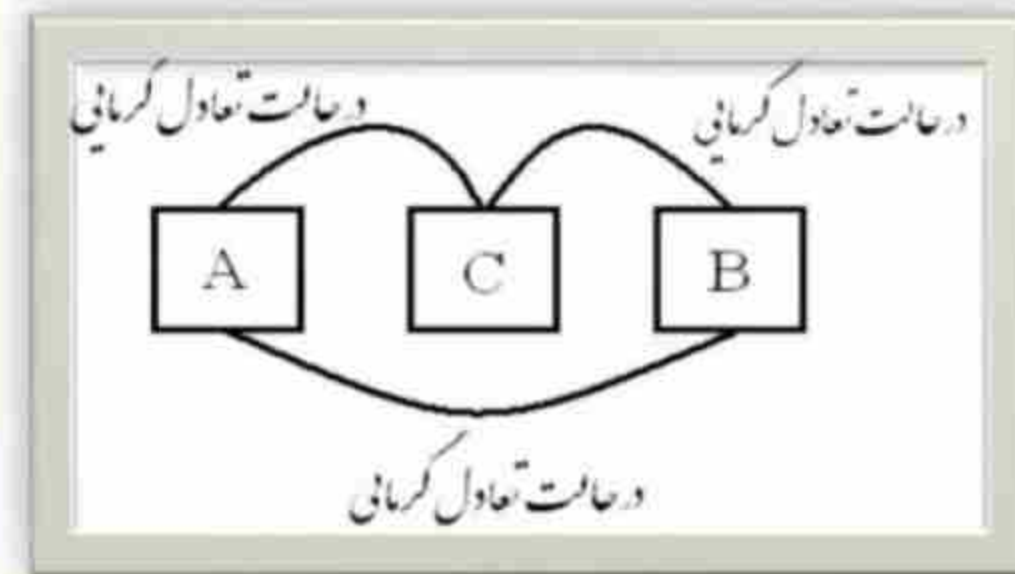
(b) Very fast compression
(nonquasi-equilibrium)

سیکل (CYCLES) (چرخه)

به مجموعه ای از فرآیندها که حالت های ابتدایی و انتهایی سیستم آنها یکسان است سیکل گفته می شود

قانون صفرم ترمودینامیک

این قانون بیان می کند که اگر دو جسم با جسم سوم در تعادل دمایی باشند، آن دو جسم با یکدیگر نیز در تعادل دمایی اند. در واقع این قانون بیان می کند که دو جسم وقتی در تعادل گرمایی هستند که هر دو یک دما داشته باشند، حتی اگر با هم در تماس نباشند.



مقیاس دمای ترمودینامیکی در SI مقیاس کلوین می باشد. (K)

مقیاس دمای ترمودینامیکی در سیستم انگلیس مقیاس رانکین می باشد. (R)

یک مقیاس درجه حرارت دیگر که با مقیاس کلوین یکسان می باشد، مقیاس درجه حرارت گاز ایده آل می باشد.

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273$$

رابطه ی بین دماهای کلوین و سانتیگراد به صورت زیر بیان می گردد:

و نیز رابطه ی بین دماهای رانکین و فارنهایت به صورت زیر می باشد.

$$T(R) = T(^{\circ}F) + 460$$

$$T(R) = 1.8T(K)$$

$$\Delta T(R) = \Delta T(^{\circ}F), \Delta T(K) = \Delta T(C)$$

$$T(^{\circ}F) = 1.8T(^{\circ}C) + 32$$

فشار (PRESSURE)

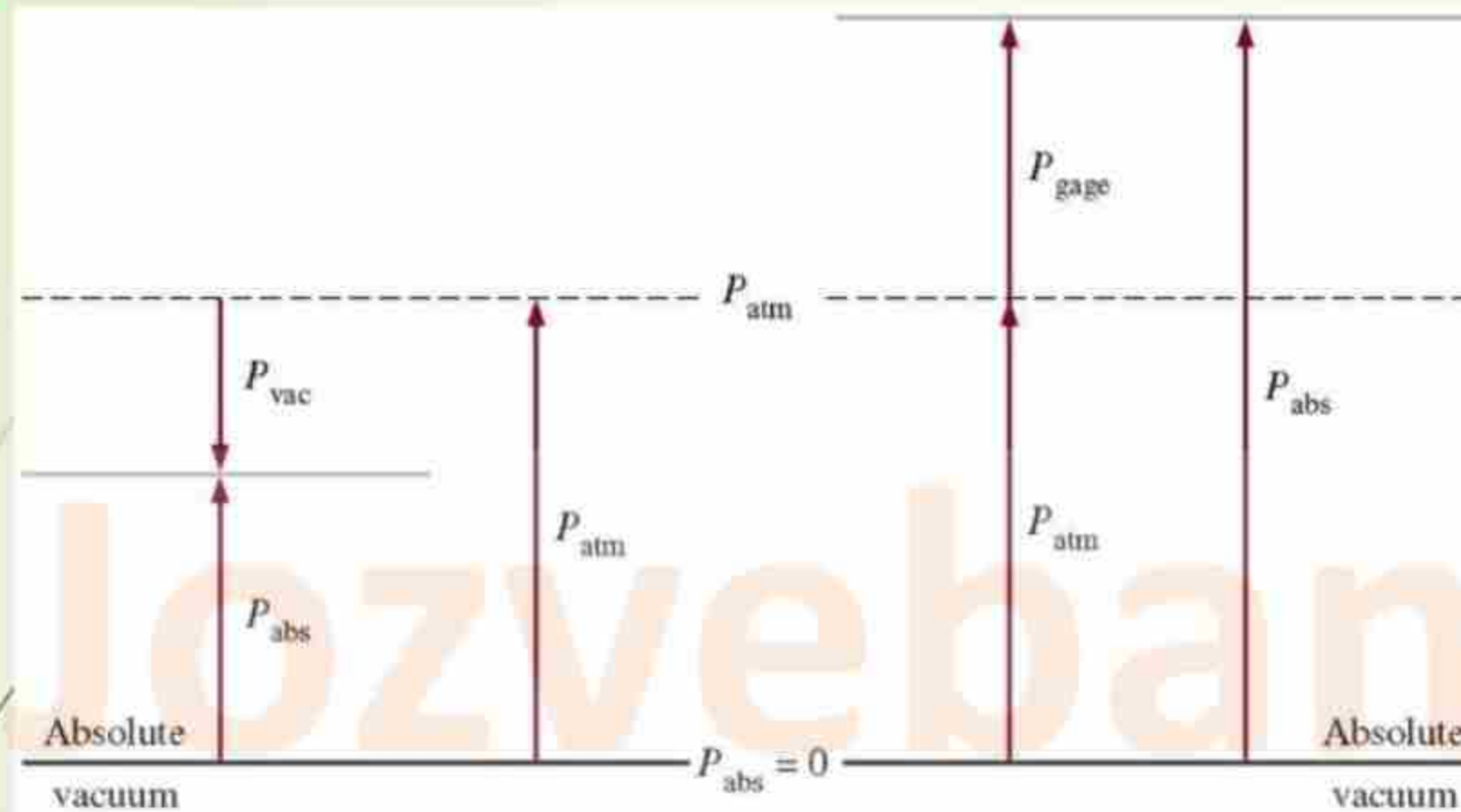
$$P = \frac{F}{A}$$

$$P_{abs} = P_{atm} \pm P_{gage}$$

در ترمودینامیک همیشه فشارها مطلق است

$$\begin{aligned} \text{lbf/in}^2 &= \text{psi} \\ \text{lbf/ft}^2 &= \text{psf} \end{aligned}$$

سیستم
انگلیسی



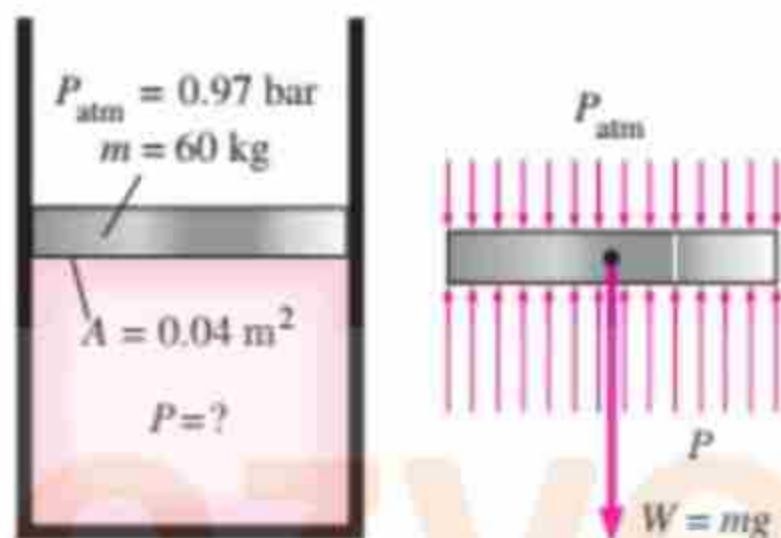
$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} \\ 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars} \\ 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \\ &= 0.9807 \text{ bar} \\ &= 0.9679 \text{ atm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N/m}^2 \\ (\text{Pa}) \end{aligned}$$

سیستم
SI

مثال:

در حالت تعادل مکانیکی باید فشار درون و بیرون با یکدیگر مساوی باشند.



$$p = \frac{F}{A}$$

$$PA = P_{\text{atm}}A + W$$

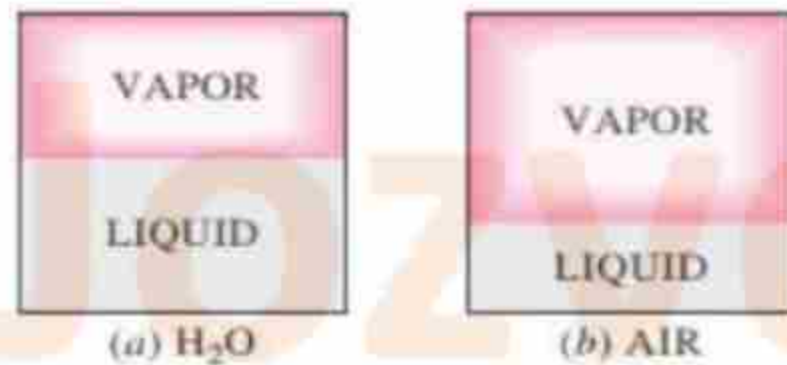
$$P = P_{\text{atm}} + \frac{mg}{A}$$

$$\begin{aligned} &= 0.97 \text{ bar} + \frac{(60 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)}{(0.04 \text{ m}^2)} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ bar}}{10^5 \text{ N/m}^2} \right) \\ &= \mathbf{1.12 \text{ bar}} \end{aligned}$$

فصل دوم: خواص ماده خالص

ماده خالص (ماده همگن و بدون تغییر در ترکیب شیمیایی)

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 آب و یخ، آب و بخار و هوا)



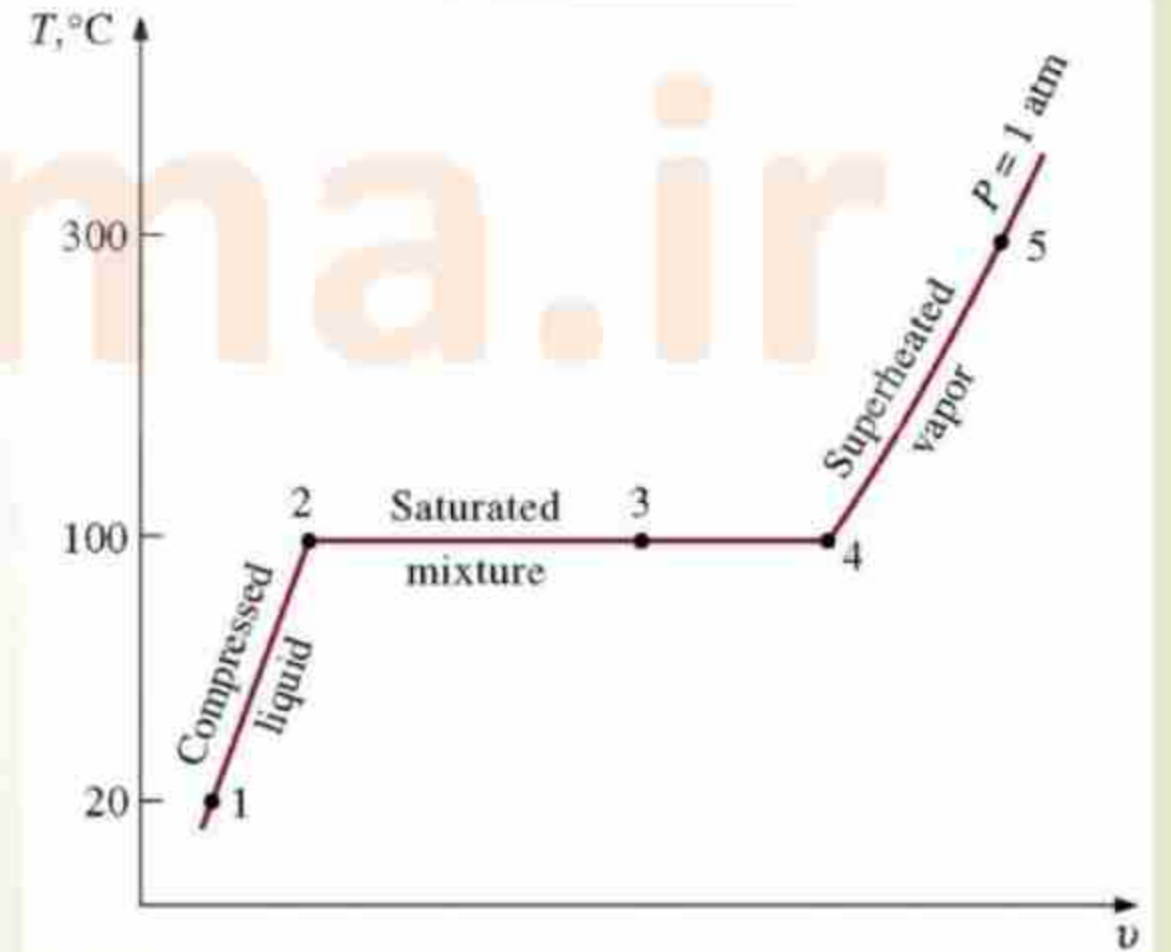
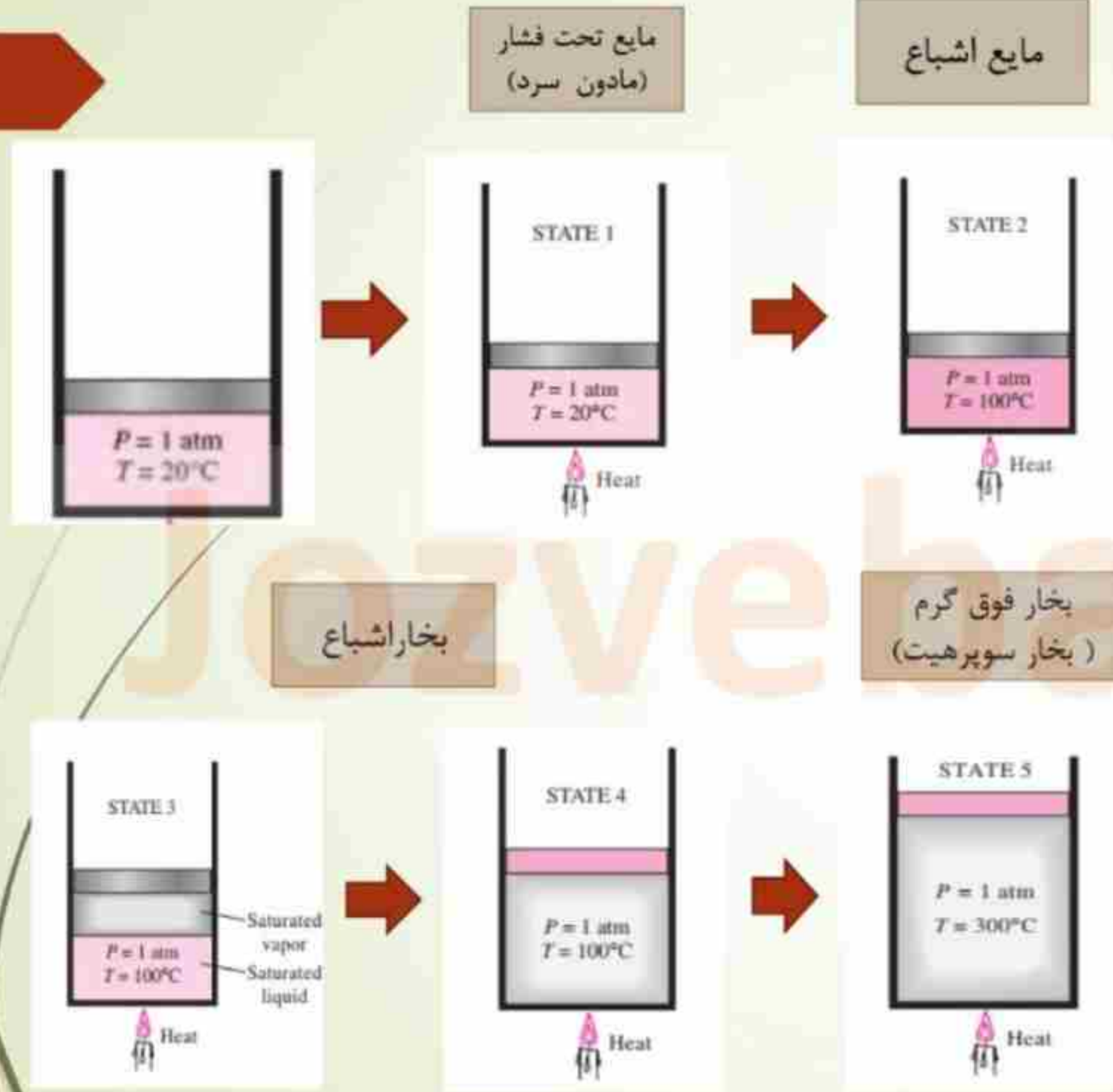
ماده خالص ساده تراکم پذیر

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

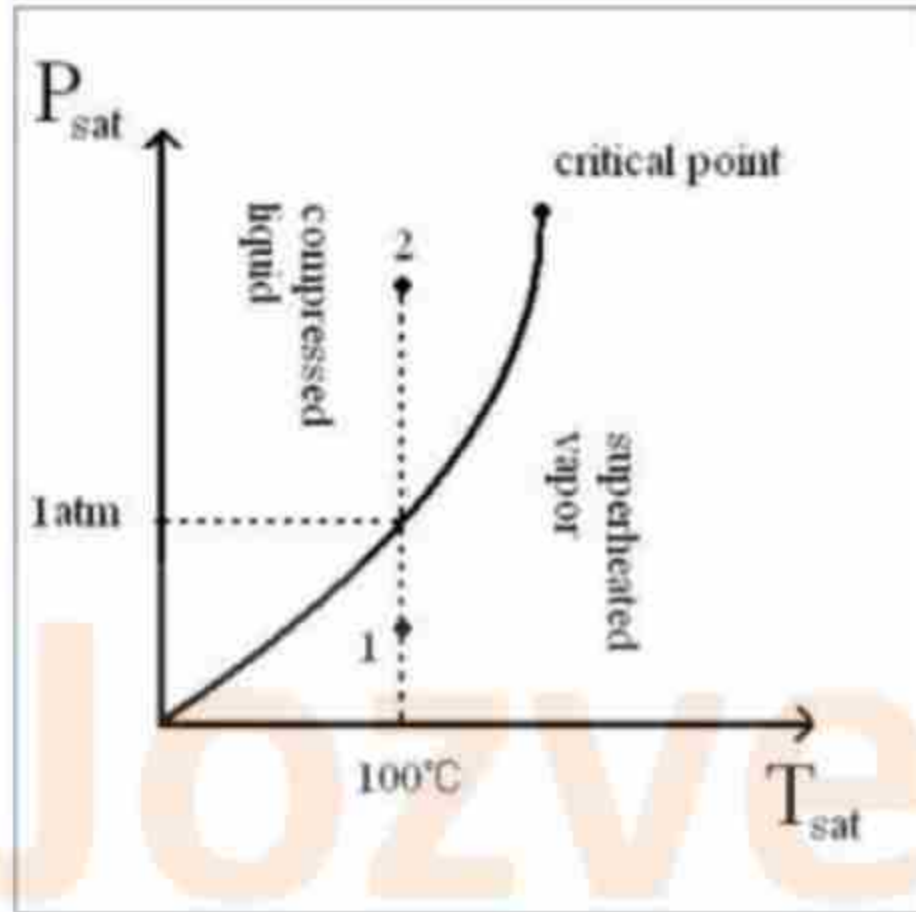
دمای اشباع (Saturation temperature)

فشار اشباع (Saturation pressure)

فرآیند تغییر فاز در فشار ثابت



منحنی بخار- مایع اشباع:



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

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

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

نتیجه: در دیاگرام فشار اشباع - دمای اشباع:

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

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

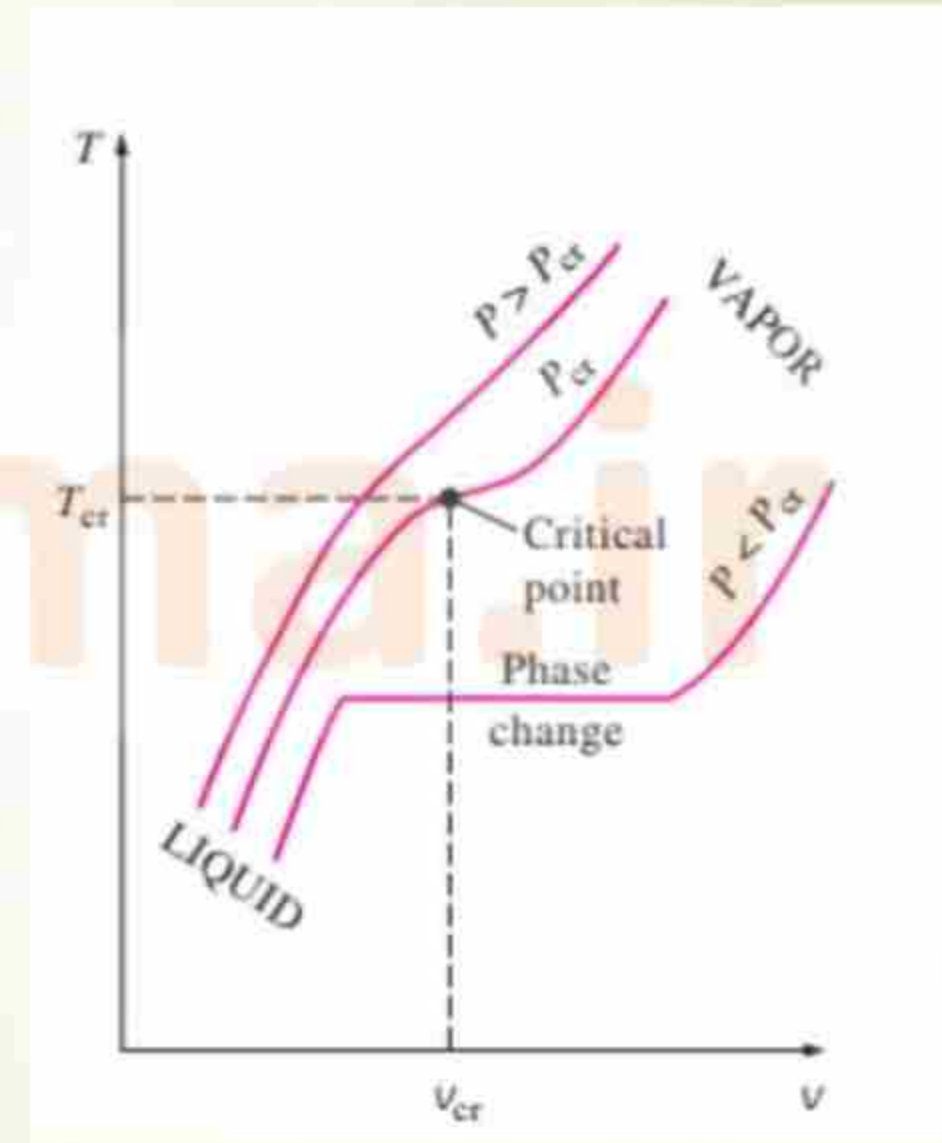
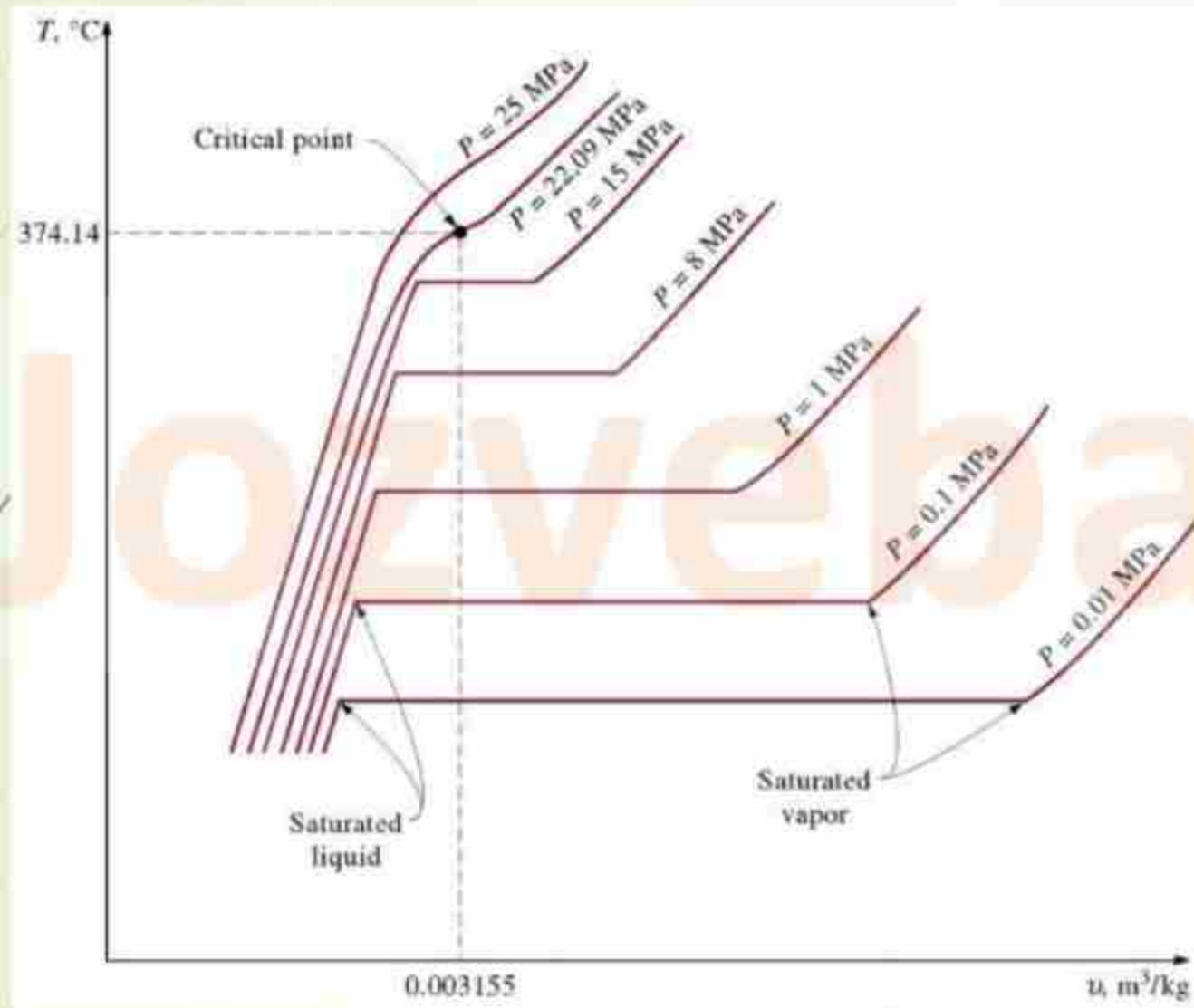
TABLE A-5

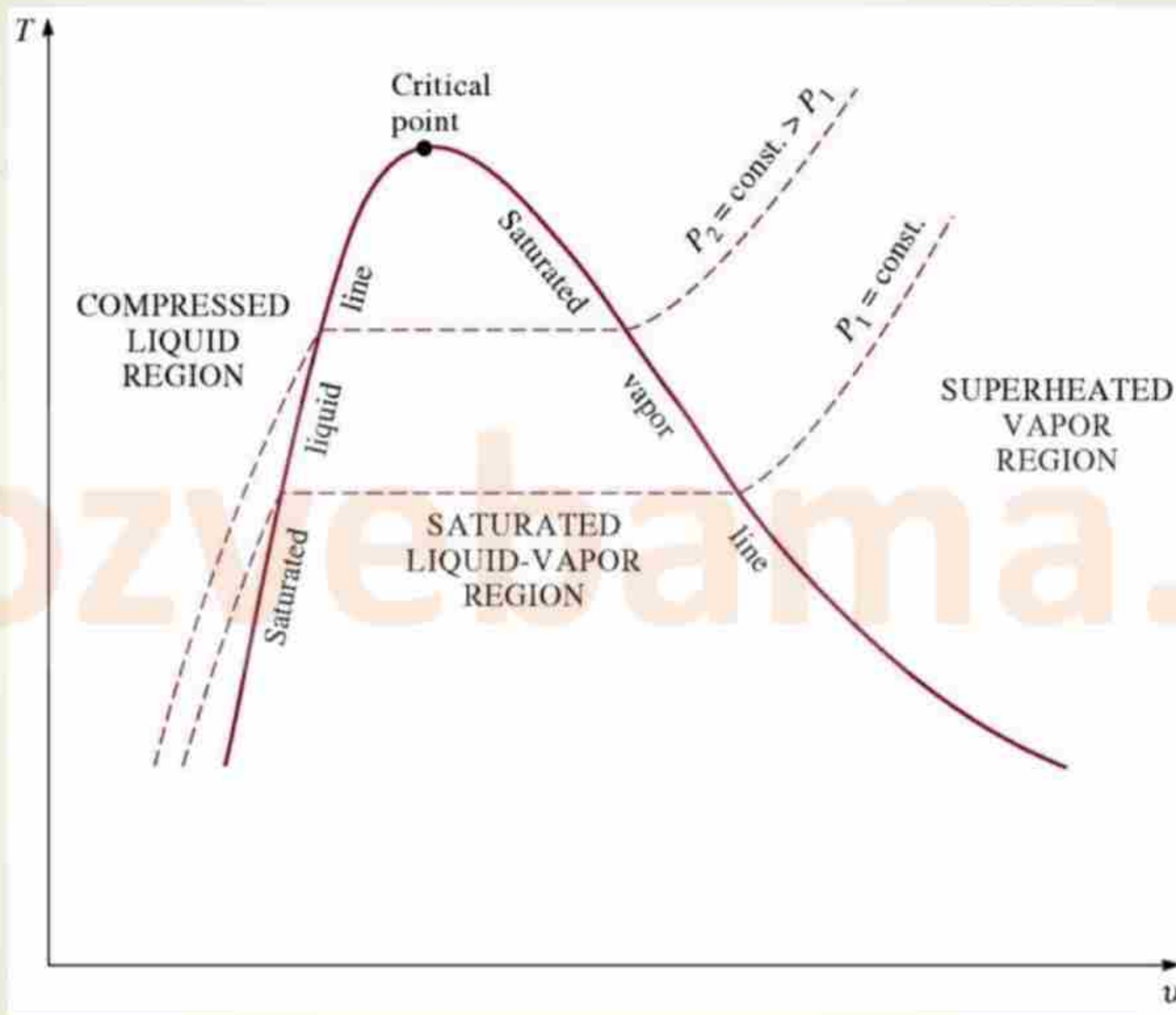
Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		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
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	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
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
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
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716

نمودار خواص برای فرآیندهای تغییر فاز

(۱) نمودار T-V





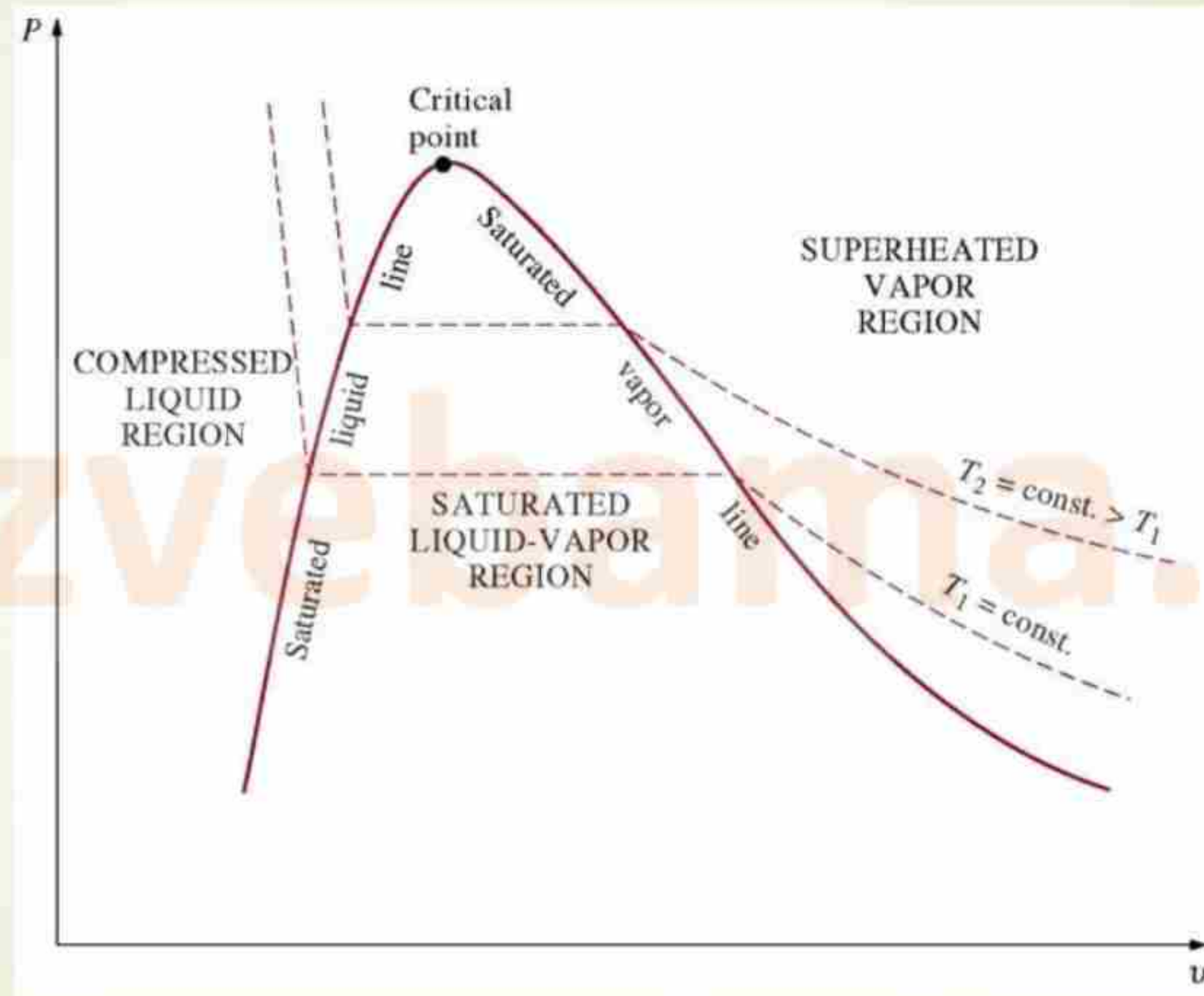
نقطه بحرانی (جدول A-1)

TABLE A - 1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg · K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998

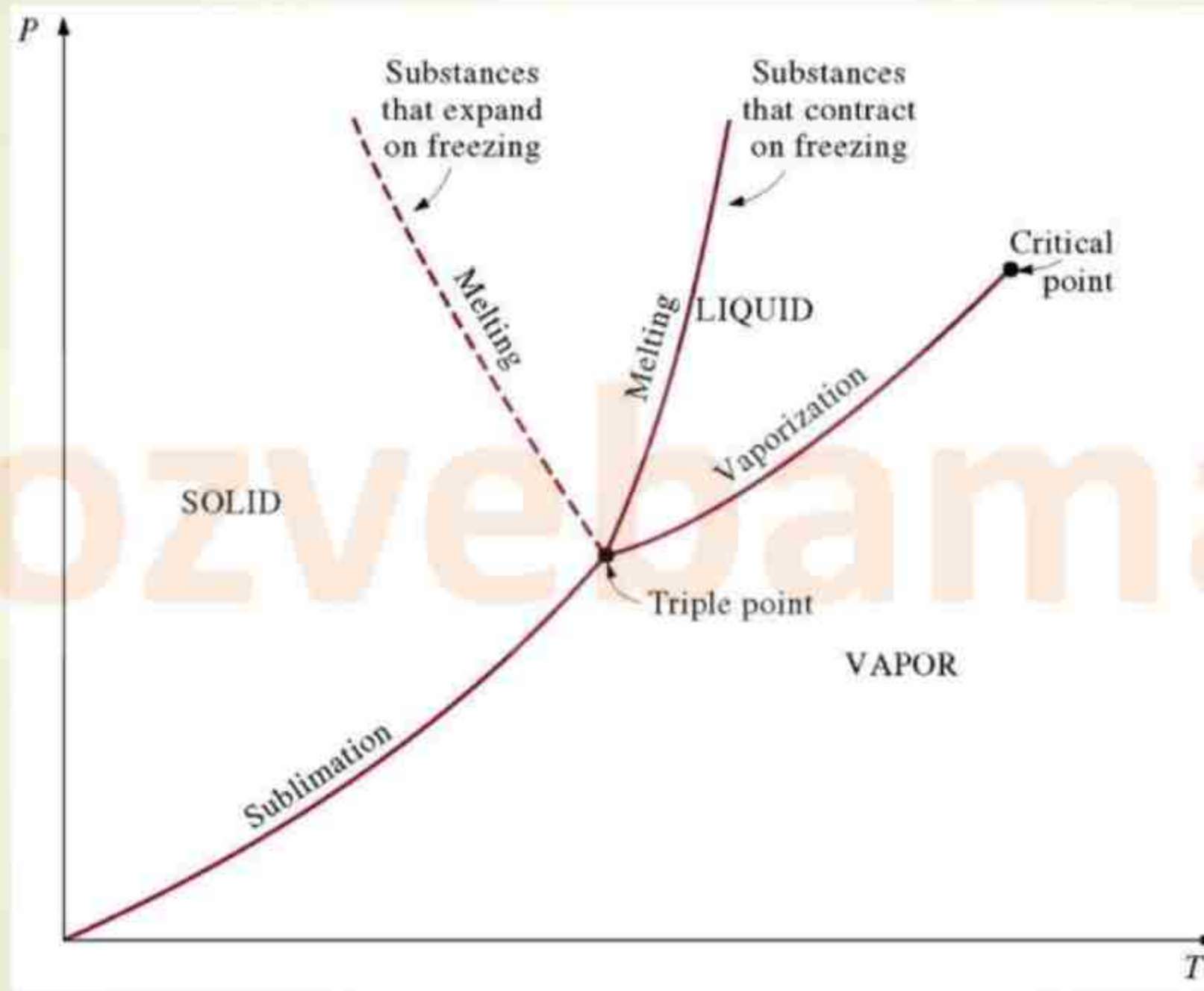
- 1- در طی فرآیند فوق گرم، دما و حجم مخصوص در فشار ثابت افزایش می‌یابند.
- 2- افزایش فشار موجب کاهش حجم مخصوص بخار اشباع و افزایش حجم مخصوص مایع اشباع شده و همچنین ماده خالص در دمای بالاتر شروع به جوشیدن می‌کند.
- 3- در فشار بحرانی که برای آب 22.09 Mpa می‌باشد ملاحظه می‌شود که فرآیند تبخیر در دمای ثابت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



- 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 $T_{sat} = f(P_{sat})$ نمی‌توان گفت فرآیند تک دما است.

- 4- در فرآیند تبخیر، دما و فشار ثابت می‌مانند اما حجم مخصوص افزایش می‌یابد.
- 5- بعد از فرآیند تبخیر کاهش فشار باعث افزایش بیشتر حجم مخصوص می‌شود.



- 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- سطح 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.

جداول خاص

الف (حالات مایع اشباع و بخار اشباع (آب A-5 و A-4)

Temp. °C T	Sat. press kPa P_{sat}	Specific volume m^3/kg	
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

Specific temperature

Specific volume of saturated liquid

Corresponding saturation pressure

Specific volume of saturated vapor

مخلوط مایع - بخار اشباع

جرم کل / جرم بخار = کیفیت

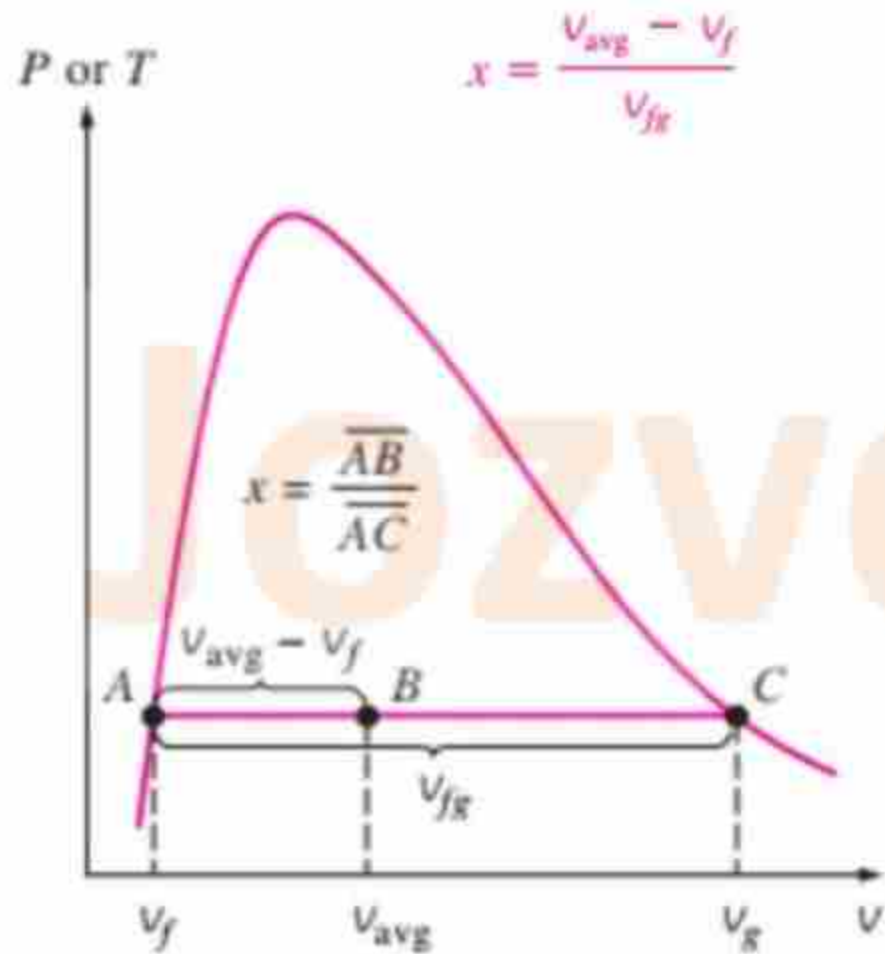
$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

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

$$0 \leq X \leq 100$$

$$0 \leq X \leq 1$$

حجم کل مخلوط اشباع



$$V = V_f + V_g$$

$$V = mV \longrightarrow m_t v_{avg} = m_f v_f + m_g v_g$$

$$m_f = m_t - m_g \longrightarrow m_t v_{avg} = (m_t - m_g) v_f + m_g v_g$$

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

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

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

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

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

انرژی داخلی

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

آنتالپی

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/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	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/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
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	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

(ب) حالت بخار فوق گرم (سوپرہیت) (آب A-6)

TABLE A-6

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)}^*$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$			
Sat. [†]	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504

(پ) حالت مایع فشرده (آب A-7)

TABLE A-7

Compressed liquid water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 5 \text{ MPa (263.94}^\circ\text{C)}$					$P = 10 \text{ MPa (311.00}^\circ\text{C)}$				$P = 15 \text{ MPa (342.16}^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586
280	0.0013326	1231.9	1235.0	3.0565	0.0013206	1212.4	1223.0	3.0410	0.0013096	1202.4	1213.0	3.0260

نتیجه گیری:

1- اگر فشار معلوم باشد:

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

2- اگر دما معلوم باشد:

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

مثال:

Saturated water—Temperature table (Continued)

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Inte liquid, u_f
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0

الحجم مقصود بخار آب اشباع 300°C با کیفیت 70% :

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$
$$= 0.001404 + 0.7(0.02167 - 0.001404) = 0.015593 \frac{m^3}{kg}$$

۲) آب در دمای 120°C و فشار 500 kPa در حالت $A-5$ ،

۱) جدول A-4 $\Rightarrow T = 120^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{\text{sat}} = 198.67\text{ kPa}$

$P > P_{\text{sat}} \rightarrow 500\text{ kPa} > 198.67 \Rightarrow$ مایع فشرده

جدول A-5 $\Rightarrow P = 500\text{ kPa} \rightarrow T = 151.83$

$T < T_{\text{sat}} \rightarrow 120 < 151.83 \Rightarrow$ مایع فشرده

Temp., $T^{\circ}\text{C}$	Sat. press., $P_{\text{sat}}\text{ kPa}$	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3

1

175	116.04	0.001057	1.0037	486.82
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37
700	164.95	0.001108	0.27278	696.22

2

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00
5	0.8725	0.001000	147.03
10	1.2281	0.001000	106.32
15	1.7057	0.001001	77.885
20	2.3392	0.001002	57.762
25	3.1698	0.001003	43.340
30	4.2469	0.001004	32.879
35	5.6291	0.001006	25.205
40	7.3851	0.001008	19.515
45	9.5953	0.001010	15.251
50	12.352	0.001012	12.026
55	15.763	0.001015	9.5639
60	19.947	0.001017	7.6670
65	25.043	0.001020	6.1935
70	31.202	0.001023	5.0396
75	38.597	0.001026	4.1291
80	47.416	0.001029	3.4053
85	57.868	0.001032	2.8261
90	70.183	0.001036	2.3593
95	84.609	0.001040	1.9808
100	101.42	0.001043	1.6720
105	120.90	0.001047	1.4186
110	143.38	0.001052	1.2094
115	169.18	0.001056	1.0360
120	198.67	0.001060	0.89133

۳) اگر آب در دمای 120°C و $v = 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ باشد، حالت را پیدا کنید؟

جدول A-4 $\Rightarrow T = 120^\circ\text{C} \rightarrow P_{sat} = 198.67$ و $v_f = 0.001060 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ و $v_g = 0.89133 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

چون v بین v_f و v_g است. پس حالت اشباع است.

$$v = v_f + x(v_g - v_f) \Rightarrow 0.5 = 0.001060 + x(0.89133 - 0.001060) \Rightarrow$$

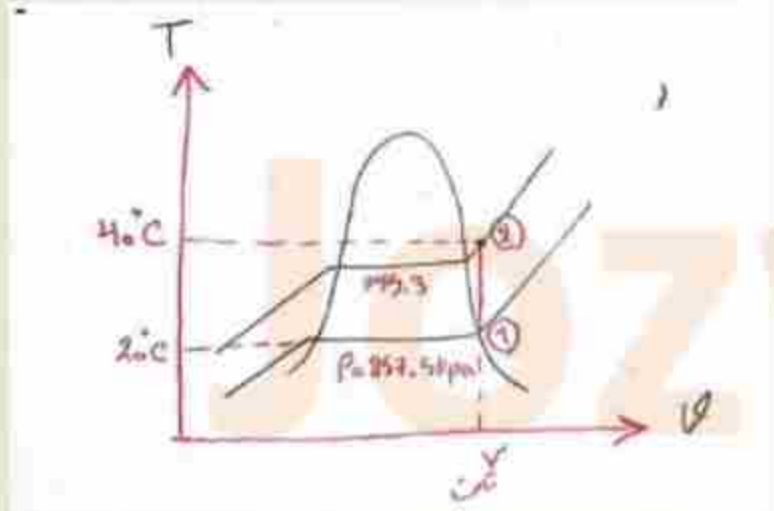
$$x = 0.56 \text{ (56\%)} \rightarrow \text{کیفیت}$$

(۴) یک ظرف صلب شامل بخار آمونیاک اشباع 20°C است به آن حرارت می دهیم تا به دمای 40°C برسد، فشارهای چقدر است ؟
 براساس حجم ثابت \leftarrow $\bar{v} = \frac{V}{m}$ ثابت



در جدول آمونیاک اشباع (1)

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 20^{\circ}\text{C} \\ v_1 &= v_g = 0.14922 \text{ m}^3/\text{kg} \\ P_{\text{sat}} &= 857.5 \text{ kPa} \end{aligned} \right\} \text{بخار اشباع}$$



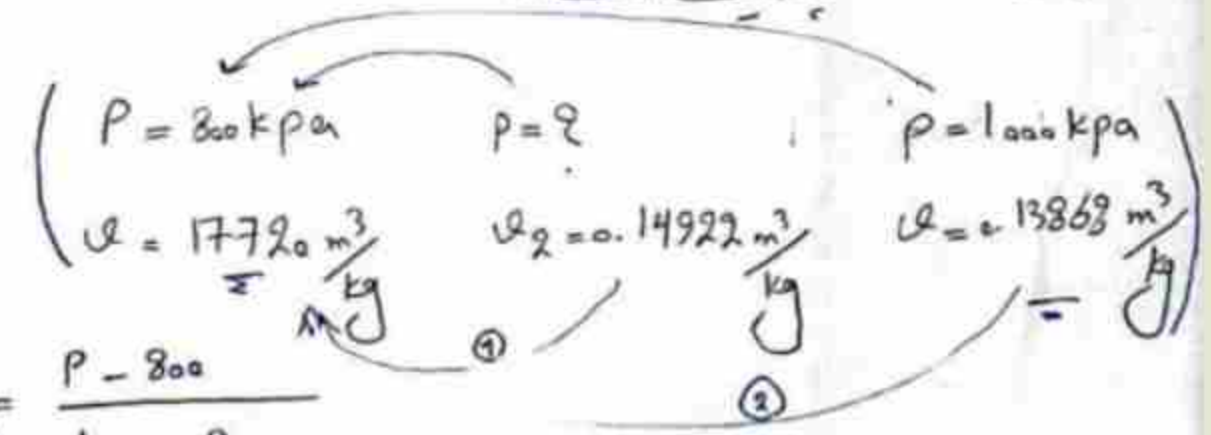
(2) $T_2 = 40^{\circ}\text{C}$
 $v_2 = v_1 = 0.14922 \text{ m}^3/\text{kg}$

جدول آمونیاک اشباع \rightarrow

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= 40^{\circ}\text{C} \\ v_f &= 0.001725 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_g &= 0.08313 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_2 > v_g$$

سایر حالت سوبریجنت است.

جدول آمونیاک اشباع $\left\{ \begin{aligned} T &= 40^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right.$



از میان برسی خطی $\Rightarrow \frac{0.14922 - 0.17720}{0.13868 - 0.17720} = \frac{P - 800}{1000 - 800}$

$\Rightarrow \boxed{P = 945.3 \text{ kPa}}$ فشارهای

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

اشباع ←

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)				
					800 kPa (17.85)		1000 kPa (24.90)	
Sat.	0.15958	1330.9	1458.6	5.1110	0.12852	1334.9	1463.4	5.0304
20	0.16138	1335.8	1464.9	5.1328	—	—	—	—
30	0.16947	1358.0	1493.5	5.2287	0.13206	1347.1	1479.1	5.0826
40	0.17720	1379.0	1520.8	5.3171	0.13868	1369.8	1508.5	5.1778
50	0.18465	1399.3	1547.0	5.3996	0.14499	1391.3	1536.3	5.2654
60	0.19189	1419.0	1572.5	5.4774	0.15106	1412.1	1563.1	5.3471
70	0.19896	1438.3	1597.5	5.5513	0.15695	1432.2	1589.1	5.4240
80	0.20590	1457.4	1622.1	5.6219	0.16270	1451.9	1614.6	5.4971

← سوپر هیت

تمرین تحویلی

جدول زیر را برای آب کامل کنید.

	$T^{\circ}\text{C}$	P_{KPa}	$u \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$	x	Phase	$h \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$
<i>a</i>		200		0.6		
<i>b</i>	125		1600			
<i>c</i>		1000	2950			
<i>d</i>	75	500				
<i>e</i>		850		0.0		
<i>f</i>		850		1		

(a) چون در این حالت کیفیت تعریف شده ← حالت اشباع و چون $x < 1$ ← مخلوط اشباع

$$A-5 \rightarrow P = 200 \text{ kPa} \Rightarrow T = 120.23^\circ\text{C}$$

$$u_f = 504.49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_{fg} = 2025 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow u = u_f + x u_{fg} = 1719.49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_f = 504.70 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg} = 2201.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow h = h_f + x h_{fg} = 1825.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(b)

$$A-4 \rightarrow T = 125^\circ\text{C} \Rightarrow P_{\text{sat}} = 232.1 \text{ kPa}$$

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

$$A-4 \rightarrow T = 125^\circ\text{C} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_f = 524.74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ u_g = 2534.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ u_{fg} = 2009.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow x = \frac{u - u_f}{u_{fg}} \approx 0.535$$

$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$A-5 \rightarrow p = 1000 \text{ kPa} \Rightarrow \begin{cases} u_f = 761.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ u_g = 2583.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} u > u_g \\ \downarrow \\ 2950 \end{matrix} \quad (C) \quad (15)$$

در حالت سوبرهیت (بخار فوق گرم) پس کیفیت معنادار.

$$A-6 \Rightarrow p = 1000 \text{ kPa} = 1 \text{ MPa}$$

$$u = 2950 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow \text{درجه میانی}$$

$$T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$u_1 = 2857.2$$

$$T = ?$$

$$u = 2950$$

$$\Rightarrow * \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{u - u_1}{u_r - u_1}$$

$$T_r = 400^\circ\text{C}$$

$$u_r = 2957.3$$

$$* \frac{T - 35}{400 - 35} = \frac{2950 - 2857.2}{2957.3 - 2857.2} \rightarrow T = \underline{395.55^\circ\text{C}}$$

$$T_1 = 35^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 3157.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T = 395.53$$

$$h = ?$$

$$T_2 = 400^\circ\text{C}$$

$$h_r = 3263.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

h هم به درجه میانی به دست می آید.

$$P = 500 \text{ kPa} \xrightarrow{\text{A-5}} T_{\text{sat}} = 151.83 \rightarrow T < T_{\text{sat}} \rightarrow \text{حالت مایع فشرده}$$

چون در حالت اشباع نسبت \leftarrow نسبت کم معنا ندارد.

$$\text{A-7} \rightarrow P = 500 \text{ kPa} = 0.5 \text{ MPa}$$

در جدول A-7 چون فشار از 5 MPa شروع می شود پس باید از ردیف زیر استفاده کرد:

EX:	$T = 100^\circ\text{C}$	$\xrightarrow{\text{A-4}}$ مقایسه (تقریب مقادیر برای مایع متناهم)	$T = 100^\circ\text{C}$
	$P = 10 \text{ MPa}$		$P = 101.35 \text{ kPa} \approx 0.1 \text{ MPa}$
A-7	$v = 0.0010385 \text{ m}^3/\text{kg}$ *		$v_f = 0.001044 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$u = 416.12 \text{ kJ/kg}$		$u_f = 418.94 \text{ kJ/kg}$
	$h = 426.5 \text{ kJ/kg}$		$s_f = 1.3069 \text{ kJ/kg}$
	$s = 1.2992$		

نکته: اگر در قسمت مایع متناهم فشار داده شده در جدول موجود نباشد (فشارهای جدول خیلی بیشتر از فشار داده شده باشند) می توان خواص را از ردیف جدول A-4 (در حالت اشباع) در همان دمای داده شده به دست آورد. چون خواص مایعات به فشار زیاد بستگی ندارد.

\leftarrow پس داریم:

$$u \approx u_f @ 75^\circ\text{C} = 313.99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h \approx h_f @ 75^\circ\text{C} = 314.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(e) چون کیفیت استاندارد ← حالت اشباع

$$A-5 \rightarrow P = 850 \text{ kPa} \rightarrow \underline{T_{\text{Sat}} = 172.94^\circ\text{C}} \quad \leftarrow \underline{\text{مایع اشباع}} \quad x = 0$$

$$u = u_f = 731 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h = h_f = 731.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(f) چون کیفیت استاندارد ← حالت اشباع

$$A-5 \rightarrow P = 850 \text{ kPa} \rightarrow \underline{T_{\text{Sat}} = 172.94^\circ\text{C}}$$

چون $x = 1$ ← بخار اشباع

$$u = u_g = 2577.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h = h_g = 2770.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

معادله حالت گاز ایده آل

معادله حالت گاز ایده آل (رابطه‌ی گاز ایده آل)

$$P = R \left(\frac{T}{v} \right) \rightarrow PV = RT \rightarrow \boxed{PV = mRT}$$

$$V = m v$$

$$mR = (MN)R = NR_u$$

$$m = MN \quad (\text{kg})$$

$$\rightarrow \boxed{PV = NR_u T}$$

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (\text{kJ/kg} \cdot \text{K or kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}) \quad \text{A-1}$$

$$PV = NR_u T$$

$$V = N \bar{v}$$

$$\rightarrow \boxed{P \bar{v} = R_u T}$$

$$R_u = \begin{cases} 8.31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 8.31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 0.0831447 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 1.98588 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} \\ 10.7316 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R} \\ 1545.37 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot \text{R} \end{cases}$$

Per unit mass	Per unit mole
$v, \text{ m}^3/\text{kg}$	$\bar{v}, \text{ m}^3/\text{kmol}$
$u, \text{ kJ/kg}$	$\bar{u}, \text{ kJ/kmol}$
$h, \text{ kJ/kg}$	$\bar{h}, \text{ kJ/kmol}$

تانی به حجم 0.5 m^3 شامل 10 kg از گاز ایده آل با جرم مولکولی $24 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ می باشد. دمای گاز 25°C است. فشار گاز:

$$V = 0.5 \text{ m}^3$$

$$m = 10 \text{ kg}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8.3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}}{24 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.346 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T = 25^\circ \text{C} * T = 25 + 273 \text{ K}$$

$$PV = mRT \Rightarrow P = \frac{mRT}{V} = \frac{10 \text{ kg} \times 0.346 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (25 + 273)}{0.5 \text{ m}^3} =$$

$$= \underline{\underline{2066 \text{ kPa}}}$$

نکات مربوط به گاز ایده‌آل:
در یک فرآیند با جرم ثابت:

$$PV = mRT$$

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

$$T_1 = T_2 \quad \longrightarrow \quad P_1 V_1 = P_2 V_2$$

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

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

(۱) در حالت کلی

(۲) دما ثابت

(۳) حجم ثابت

(۴) فشار ثابت

$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$Pv = ZRT$$

(Z)

(COMPRESSIBILITY FACTOR) ضریب تراکم پذیری

A-15a
A-15b

$$Z = \frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{ideal}}}$$

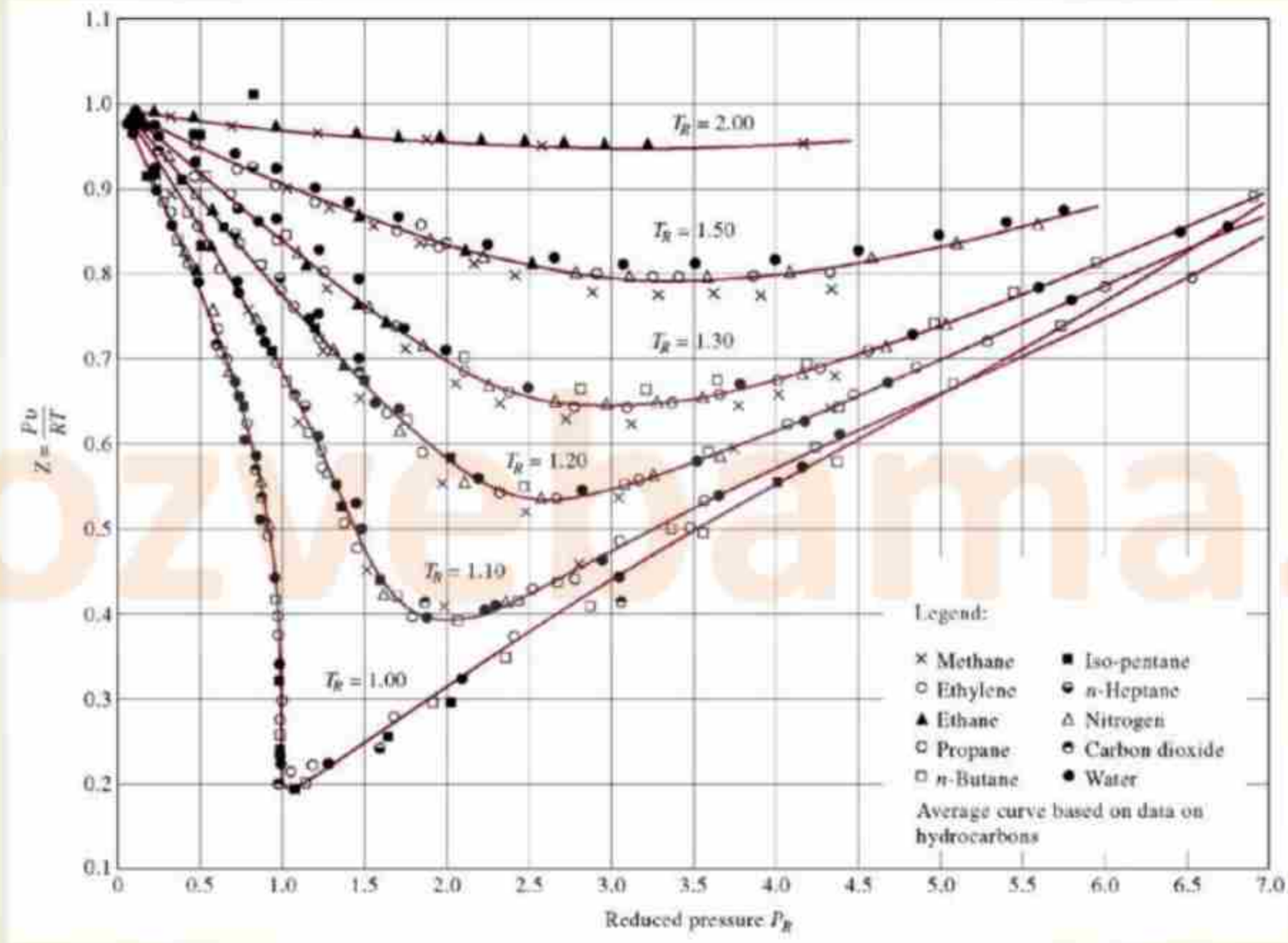
میزان انحراف گاز واقعی را از گاز کامل نشان می‌دهد

IDEAL
GAS

$$Z = 1$$

REAL
GASES

$$Z \begin{cases} > 1 \\ = 1 \\ < 1 \end{cases}$$



مشاهدات زیر را می‌توان از نمودار تراکم‌پذیری به دست آورد:

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

نکته:

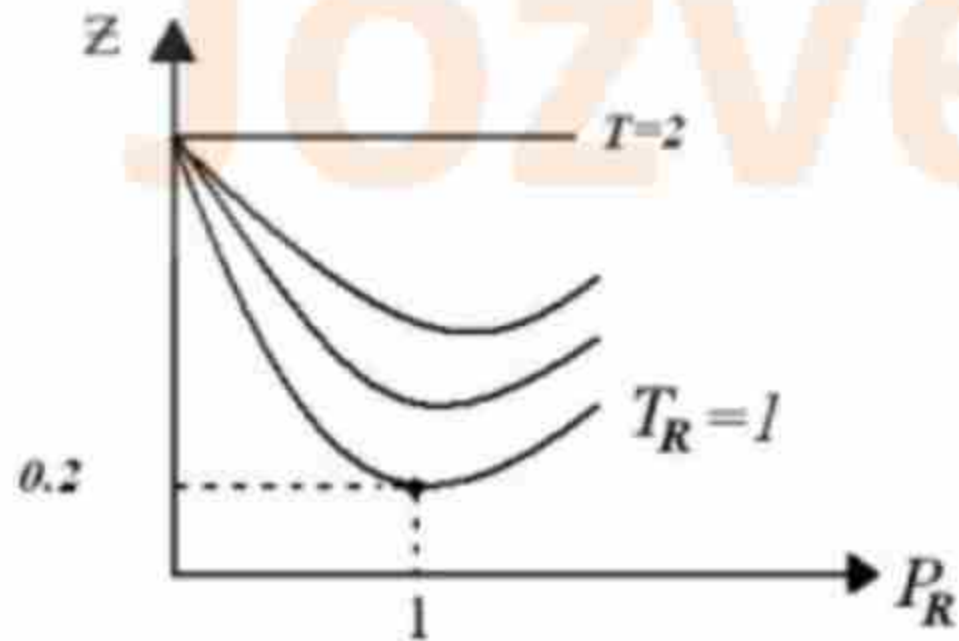
- ✓ هرچه چگالی یک گاز بیشتر باشد از گاز کامل دورتر است و هرچه چگالی کمتر باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
- ✓ هرچه واکنش بین مولکولها کم باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
- ✓ هرچه فاصله بین مولکولها کم باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
- ✓ هرچه فشار بیشتر باشد از گاز کامل دورتر است و هرچه فشار کمتر باشد به گاز کامل نزدیکتر است.
- ✓ هرچه دما بیشتر باشد فاصله مولکولها بیشتر می‌شود و به گاز کامل نزدیکتر است.

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

A-1

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.

نقطه بحرانی
(نقطه ۱)



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

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

$$P_R \ll 1 \quad Z = 1 \Rightarrow \text{Ideal gas}$$

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

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

(۱) جدول (۲) معادله گاز کامل (۳) معادله گاز واقعی

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:

$$\xrightarrow{\text{table A-12}} P = 1\text{MPa} \quad T_{\text{sat}} = 39.39^\circ\text{C}$$

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

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

$$\xrightarrow{\text{table A-13}} P = 1\text{MPa} \quad T = 50^\circ\text{C} \Rightarrow v = 0.02171 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$PV=RT$$

2- با استفاده از معادله گاز کامل :

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

$$\overset{A-1}{\longrightarrow} R = 0.08149 \frac{kJ}{kg \cdot k}$$

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

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

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

3- با استفاده از معادله گاز واقعی:

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

Z را بر اساس شکل A-15 بدست می آوریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{A-15a} \rightarrow 0 < Pr < 1 \\ \text{A15-b} \rightarrow 1 < Pr < 7 \end{array} \right.$$

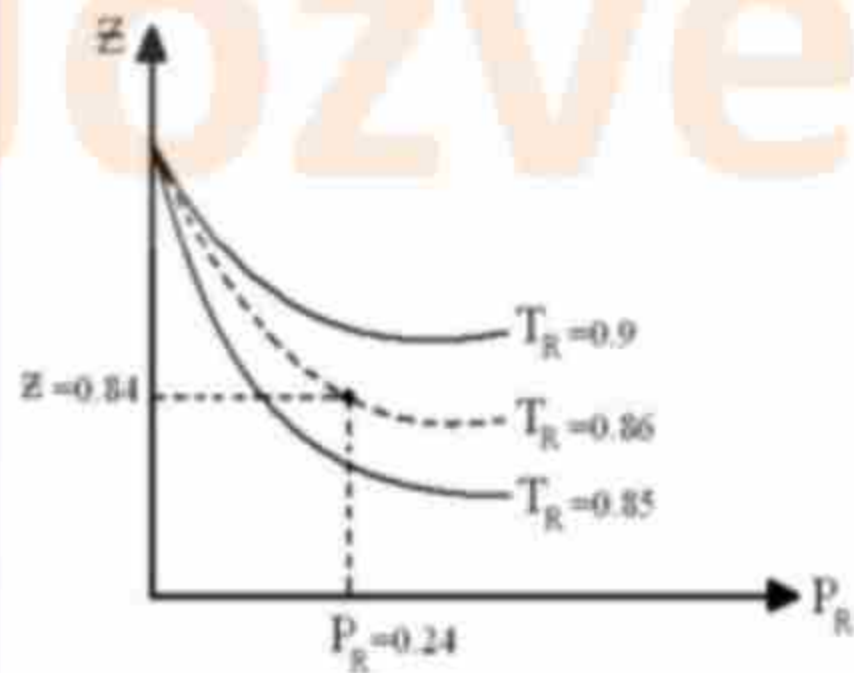
در شکل A-15 شکل داخلی درون این شکل برای $0 < P_2 < 0.1$ است. پس با توجه به جدول A-1، T_c و P_c را بدست می آوریم:

$$A-1 \begin{cases} P_{cr} = 4.06 \text{ MPa} \\ T_{cr} = 374.2 \text{ k} \end{cases} \Rightarrow P_R = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{1 \text{ MPa}}{4.06 \text{ MPa}} = 0.24$$
$$\Rightarrow T_R = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{323 \text{ k}}{374.2 \text{ k}} = 0.86$$

چون $0 < P_R < 1$ است پس به شکل A-15a 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 :



$$z = 0.84$$

$$v = Z v_{ideal}$$

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

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

تمرین ۲

۱) نیتروژن در دمای 20°C و فشار 1MPa است. آیا فرض گاز ایده‌آل مناسب است؟

۲) آمونیاک در دمای 20°C و فشار 1MPa است. آیا فرض گاز ایده‌آل مناسب است؟

در جدول تبدیل $\Rightarrow P = 1000\text{ kPa} = 1\text{MPa} \Rightarrow T_{\text{sat}} = 103.61\text{ K} \Rightarrow T > T_{\text{sat}} \Rightarrow$ بخار سبک
 $T = 20 + 273 = 293\text{ K}$
 پس امکان تبدیل بودن آن وجود دارد.

A-1 $\xrightarrow{\text{N}_2}$ $T_{\text{cr}} = 126.2\text{ K}$, $P_{\text{cr}} = 3.39\text{ MPa}$

مشارط هشر بیانته $\Rightarrow P_r = \frac{P}{P_{\text{cr}}} = \frac{1}{3.39} = 0.295 \Rightarrow P_r \ll 1$
 فرض گاز ایده‌آل مناسب است.

دمای کاهش یافته $\Rightarrow T_r = \frac{T}{T_{\text{cr}}} = \frac{(20+273)}{126.2} = 2.32 \Rightarrow T_r \gg 2$

جدول اشباع $\Rightarrow T = 20^{\circ}\text{C} \Rightarrow P_{\text{sat}} = 857.2\text{ kPa}$
 $P = 1000\text{ kPa} \Rightarrow P > P_{\text{sat}} \Rightarrow$ مایع فشرده

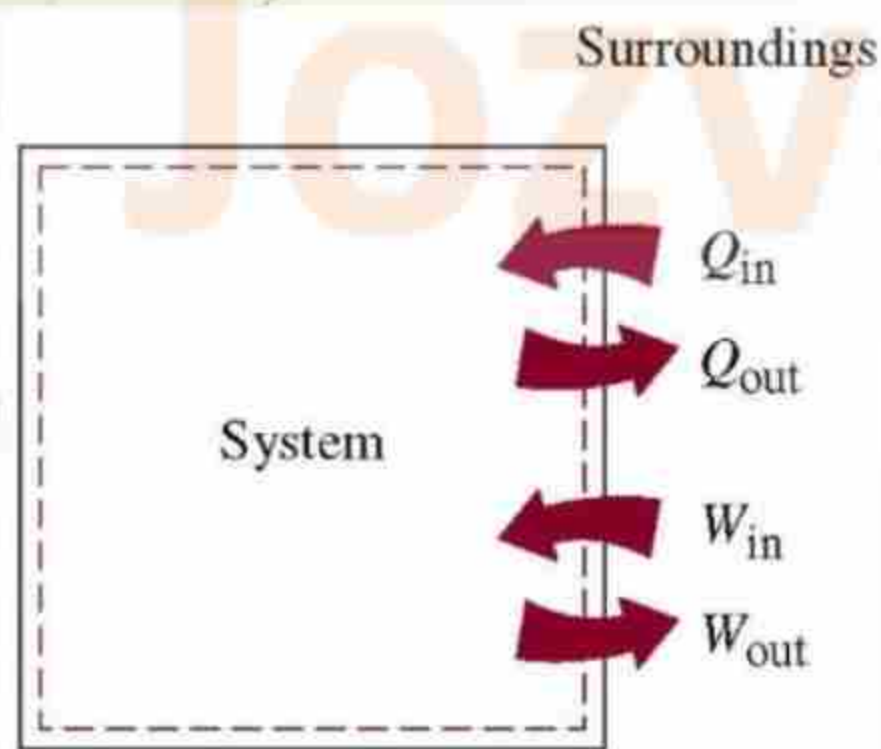
چون در این حالت آمونیاک مایع فشرده است و طاری نیست پس فرض گاز ایده‌آل مورد قبول نیست.

$$\int_1^2 \delta Q = {}_1Q_2$$

حرارت (heat)

انرژی در حال گذر است و فقط وقتی شناخته می شود که مرزهای یک سیستم را قطع کند.
فرآیند آدیباتیک:

به فرآیندی که در طی آن هیچ انتقال حرارتی با محیط صورت نگیرد.
برای آدیباتیک یک فرآیند دو راه وجود دارد:



$$\dot{Q} \equiv \frac{\delta Q}{dt}$$



توان حرارت

W, Kw, Mw

$$q \equiv \frac{Q}{m}$$



حرارت در واحد جرم

$$\delta W_b = F ds = PA ds = P dV$$

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad (\text{kJ})$$

کار (WORK)

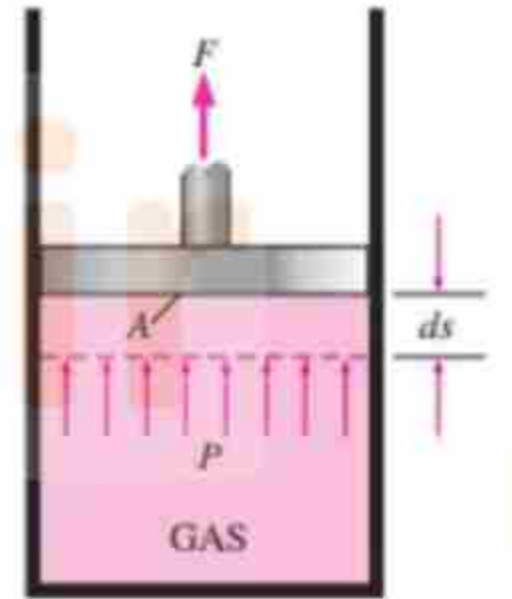
کار انجام شده توسط یک سیستم روی محیط (مثبت)
کار انجام شده توسط محیط روی سیستم (منفی)

$$w = W/m$$

کار در واحد جرم

$$\dot{W} \equiv \frac{\delta W}{dt}$$

توان کار



مقایسه کار و حرارت:

- 1) حرارت و کار هر دو پدیده گذرا و انتقالی هستند یعنی هر دو در یک نقطه صورت نمی‌گیرند بلکه در یک فرآیند صورت می‌گیرند.
- 2) گرما و کار هر دو پدیده مرزی هستند و در مرز سیستم شناسایی و معنا دارند و در درون و بیرون سیستم معنا ندارند.
- 3) کار و گرما هر دو تابع مسیر بوده و دیفرانسیل کامل نمی‌باشند. (مقادیر آنها علاوه بر حالت نهایی به مسیر طی شده در فرآیند نیز بستگی دارد)
- 4) از نظر علامت اگر کار توسط سیستم روی محیط انجام شود مثبت است و اگر حرارت از محیط به سیستم منتقل شود مثبت است.
- 5) اگر کار توسط محیط روی سیستم انجام شود منفی است و اگر حرارت از سیستم به محیط منتقل شود منفی است.

کار الکتریکی

اشکال کار

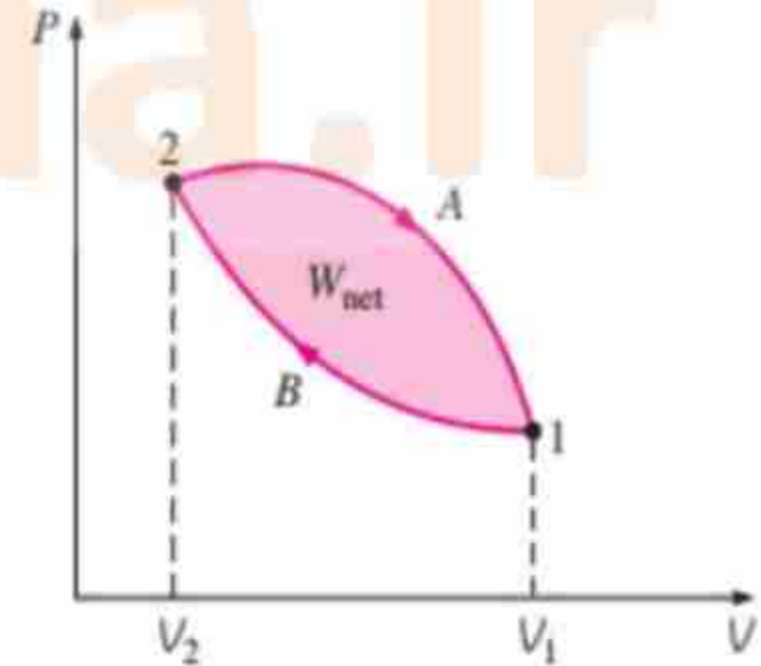
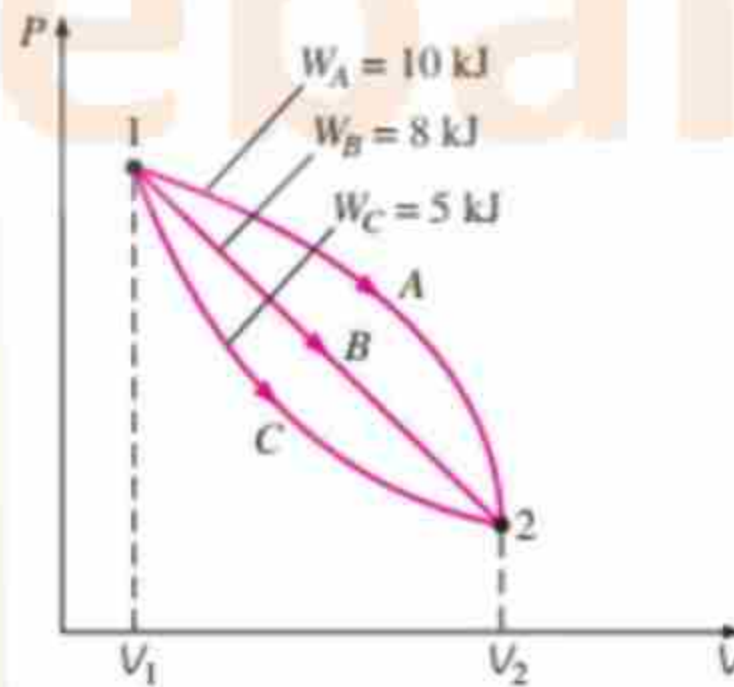
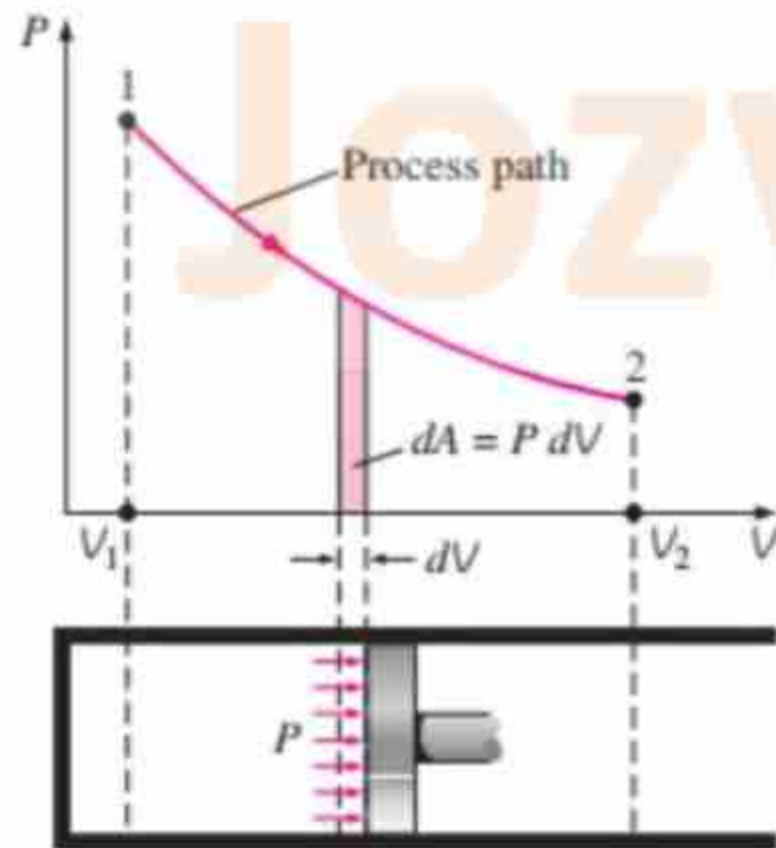
کار مکانیکی

اشکال کار مکانیکی

(۱) کار مرزی: کار انبساط و انقباض

مساحت زیر نمودار P-V برابر است با کار انجام شده طی یک فرآیند تغییر حجمی مربوط به یک سیستم بسته

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad (\text{kJ})$$



انواع کار مرزی:

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad (\text{kJ})$$

$$dv = 0$$

$$W_b = 0$$

(1) فرآیند حجم ثابت (Iso volume)

$$P = \text{cte}$$

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} P dV = P(V_2 - V_1)$$

(2) فرآیند فشار ثابت برای گاز کامل (Iso bar)

(3) فرآیند دما ثابت برای گاز کامل (Iso thermal)

(4) فرآیند پلی تروپیک (polytorpic)

(۳) فرآیند دما ثابت برای گاز کامل (Iso thermal)

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

$$PV = mRT \quad PV = cte \Rightarrow P = \frac{C}{V}$$

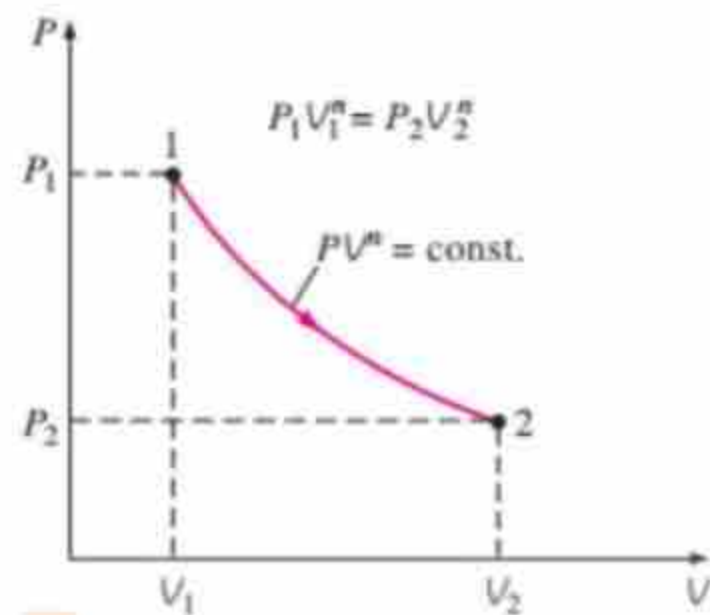
$$W_b = \int P \cdot dV = \int \frac{C}{V} dV = C \int \frac{dV}{V} = C \ln V \Rightarrow W_b = C \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_2 V_2 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}$$

$$W_b = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$PV^n = cte$$

(polytorpic) فرآیند پلی تروپیک



If:

$$n = 0 \Rightarrow PV^0 = cte \Rightarrow P = cte \Rightarrow \text{Iso bar}$$

$$n = 1 \Rightarrow PV^1 = cte \Rightarrow T = cte \Rightarrow \text{Iso therm}$$

$$\lim V_1^n = \lim V_2^n \Rightarrow V_1 = V_2 \Rightarrow \text{Iso valume}$$

$$PV^n = C \Rightarrow P = \frac{C}{V^n} = CV^{-n}$$

$$W_b = \int P dV = \int C V^{-n} dV = C \frac{V^{1-n}}{1-n}$$

$$W_b = C \frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{P_2 V_2^n \cdot V_2^{1-n} - P_1 V_1^n \cdot V_1^{1-n}}{1-n}$$

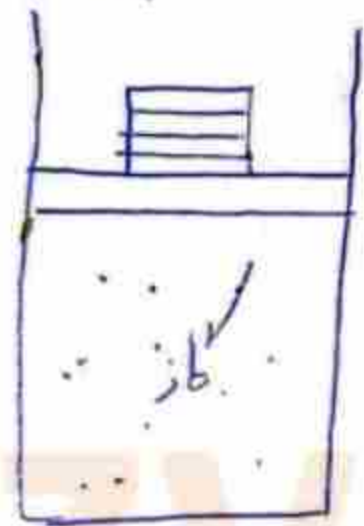
$$n \neq 1 W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

$$n \rightarrow \infty \Rightarrow W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\infty} = 0$$

سوال

گاز درون سیلندر را در مقدار بلندی بردی بسپتون وزن‌های کوچک مقدار گرفته اند، فشار اولیه 200 kPa

و حجم 0.04 m^3 است.



الف) مشعلی زیر سیلندر قرار می‌دهیم تا به گاز حرارت دهد و حجم آن در

فشار ثابت 0.1 m^3 افزایش می‌یابد، کار انجام شده چه مقدار است؟

$$\text{مراکز فشار ثابت} \Rightarrow w_{12} = \int p dV = p(V_2 - V_1) = 200 \times (0.1 - 0.04) = 12 \text{ kJ}$$

← حجم افزایش یافته ← کار مثبت ← کار روی محیط انجام شده..

ب) همان سیستم با همان شرایط اولیه، گاز را در حرارت من رهیتم و ضمن آنکه وزن ها را هم می کنیم، به طوری که

پروسه ای یسا شایسته می شود، کار انجام شده چه مقدار است $P_1 V_1 = P_2 V_2 = cte \Rightarrow 200 \times 0.004 = P_2 \times 0.1$
 $P_2 = 80 \text{ kPa}$

کار مثبت $w_{12} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 200 \times 0.004 \ln \frac{0.1}{0.004} = 7.33 \text{ kJ}$

ج) در حال پروسه ضمن حرارت دادن، وزن ها را طوری برداشته می شوند که $PV = cte$ باشد

کار چه مقدار است؟ $w_{12} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} \Rightarrow \frac{60.77 \times 0.1 - 200 \times 0.004}{1 - 1.3} = 6.47 \text{ kJ}$
 کار مثبت

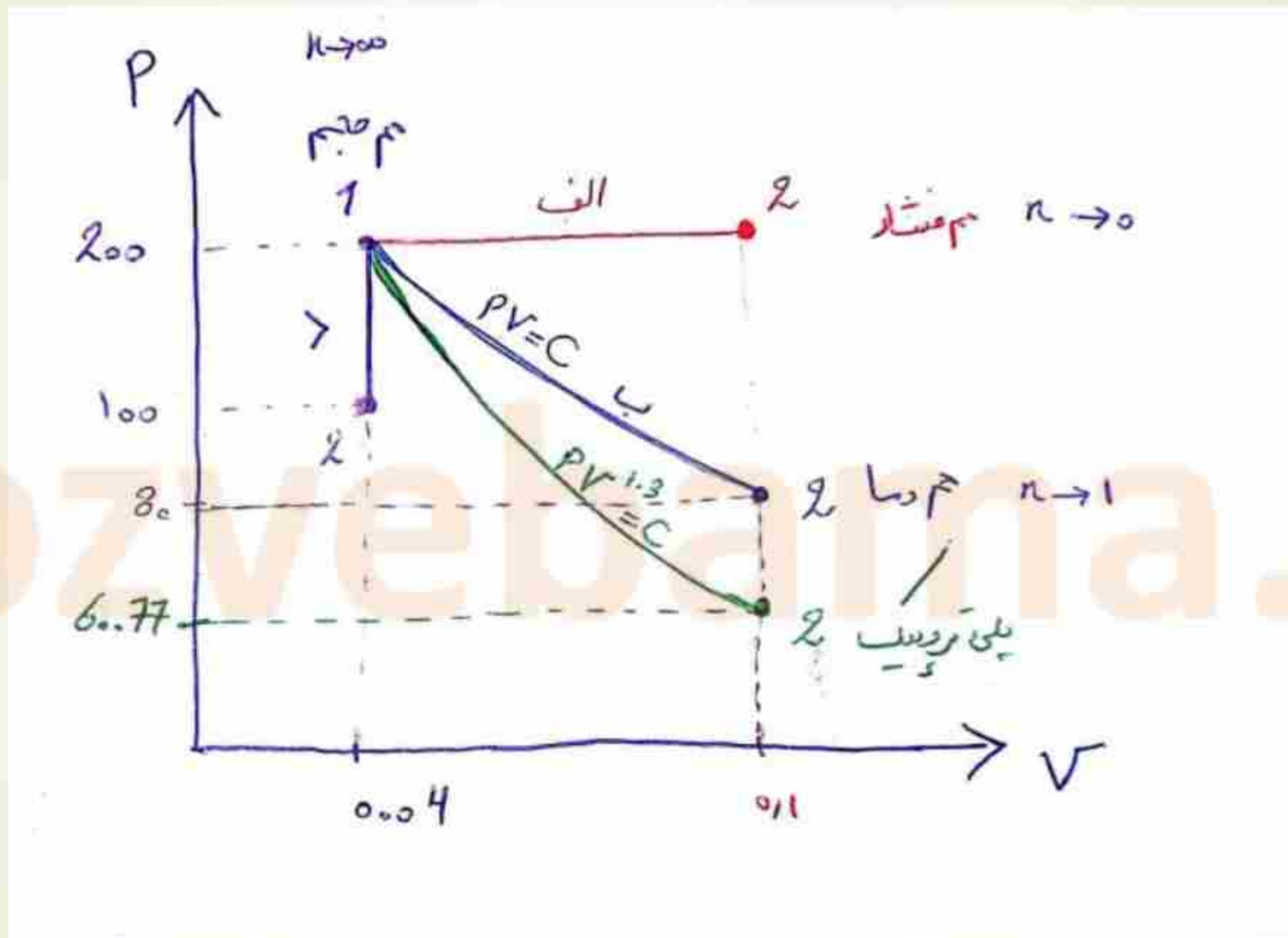
$P_1 V_1^{1.3} = P_2 V_2^{1.3} \Rightarrow 200 \times 0.004^{1.3} = P_2 \times 0.1^{1.3} \Rightarrow P = 60.77 \text{ kPa}$

د) فرض کنید در خلال پروسه‌ی حرارت گرفتن سیستمی توسط یک سین ثابت نگه داشته شده است. آن مقدار حرارت مندرجیم تا به فشار 100 kPa برسد، کار چه مقدار است؟

فشار حجم نداریم.

$$w_{12} = \int p dV = 0$$

Jozevabama.ir



$$m_p a \cong 0 = \sum F_{\uparrow} - \sum F_{\downarrow}$$

$$\sum F_{\uparrow} = PA, \quad \sum F_{\downarrow} = m_p g + P_0 A + k_s(x - x_0) + F_1$$

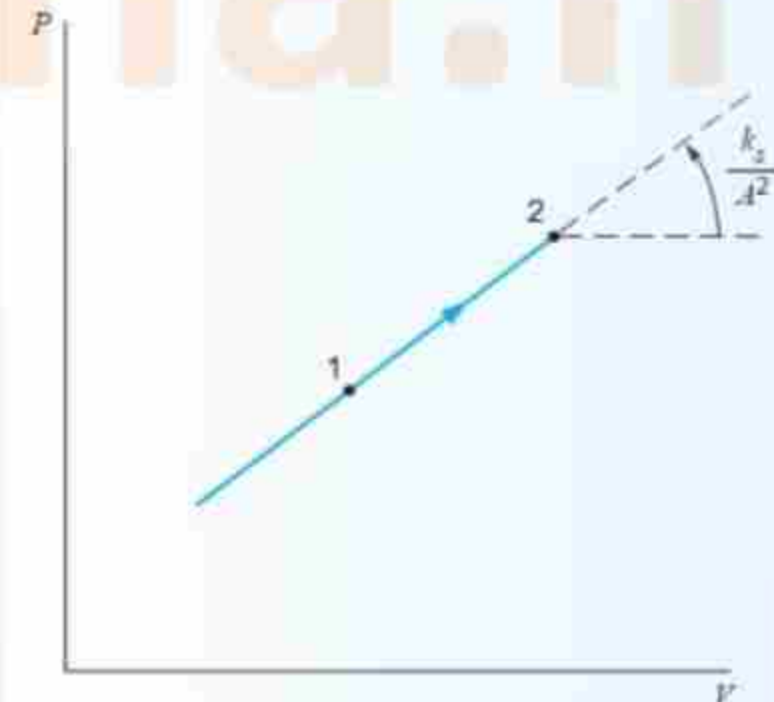
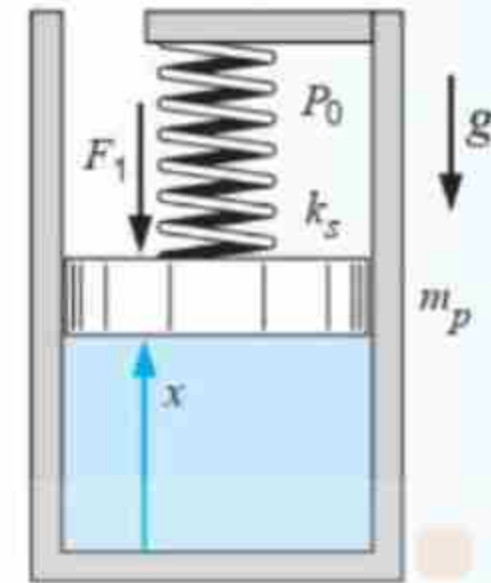
$$P = P_0 + [m_p g + F_1 + k_s(x - x_0)] / A$$

$$P = P_0 + \frac{m_p g}{A} + \frac{F_1}{A} + \frac{k_s}{A^2} (V - V_0) = C_1 + C_2 V$$

$${}_1 W_2 = \int_1^2 P dV = \text{area under the process curve}$$

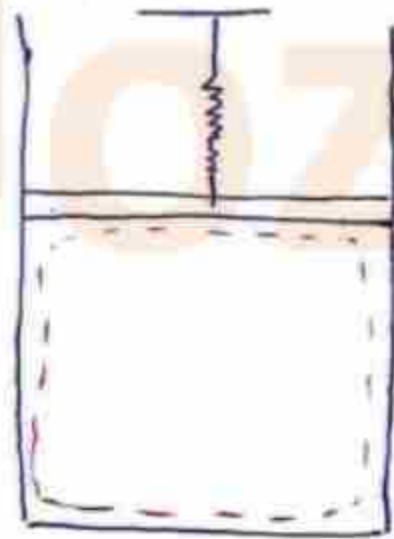
$${}_1 W_2 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)(V_2 - V_1)$$

$$W_{\text{spring}} = \int F dr = \int_{x_1}^{x_2} K dx = \frac{1}{2} K (x_2^2 - x_1^2)$$



سیلندری شامل نیم لیتر نیتروژن آمونیاک -20°C با کیفیت 25٪ می باشد، آمونیاک حرارت داده می شود تا زمانی آن به 20°C برسد، در این حالت حجم آن 1.41 برابر شده است، فشار نهایی و دمای انجام شده

توسط آمونیاک چقدر است ؟



آمونیاک حالت ①

$$-20^{\circ}\text{C}$$

$$کیفیت = 25\% = x_1$$

جدول اشباع آمونیاک $\rightarrow T = -20^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{\text{Sat}} = 190.2 \text{ kPa}$

$$v_f = 0.001504 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \quad v_{fg} = 0.62184 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_1 = v_f + x_1 v_{fg} \Rightarrow 0.001504 + 0.25 \times 0.62184 = 0.156964 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\leftarrow \text{اولی} \quad V_1 = m v_1 = 0.5 \times 0.156964 = 0.078482 \text{ m}^3 *$$

$$\leftarrow \text{دومی} \quad V_2 = 1.41 V_1 = 1.41 \times 0.078482 = 0.11066 \text{ m}^3 * \rightarrow v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0.11066}{0.5} = 0.22132 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\textcircled{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_2 = 20^{\circ}\text{C} \\ v_2 = 0.22132 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{array} \right.$$

\Rightarrow جدول اشباع

$$v_f = 0.001638 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_g = 0.14922 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$\rightarrow v_2 > v_g$

کاملاً مایع است

جدول سیپر هیت $T = 20 \Rightarrow P = 600 \text{ kPa}$

$$v = 0.22154$$

$$P_2 = ?$$

$$v_2 = 0.22132$$

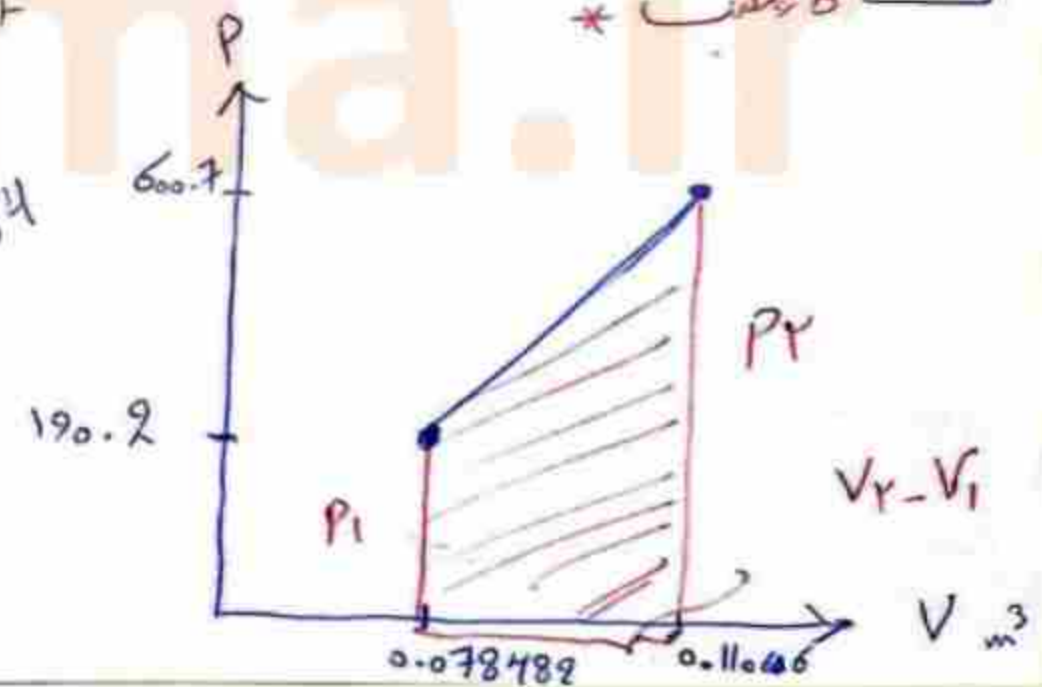
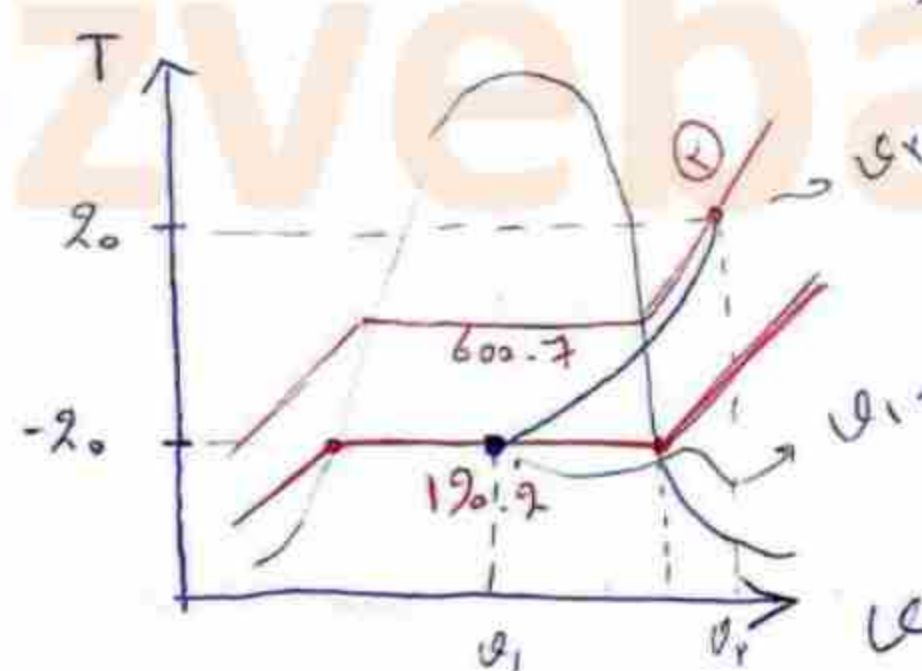
$$P = 800$$

$$v = 0.16138$$

مشارهت

$$\rightarrow P_2 = 600.7 \text{ kPa}$$

$$w_{12} = \frac{P_1 + P_2}{2} (v_2 - v_1) = \frac{190.2 + 600.7}{2} (0.11066 - 0.78482) = 12.7 \text{ kJ}$$



* کانت *

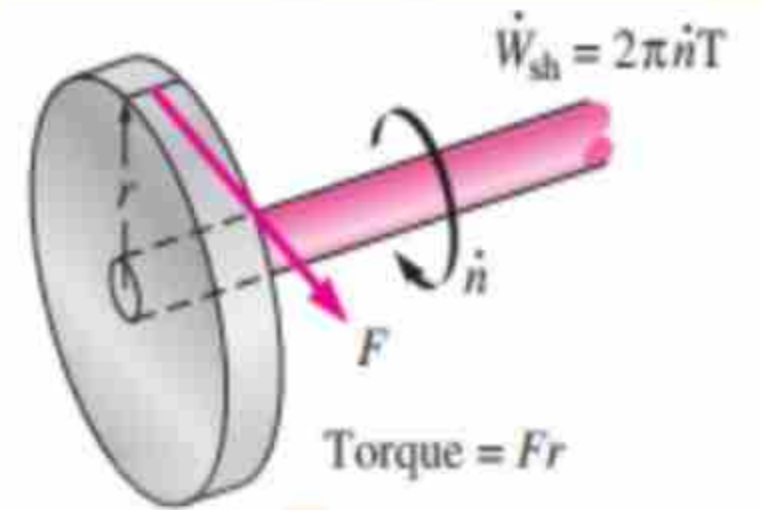
(۳) کار محوری (توان شفت)

$$\tau = Fr \rightarrow F = \frac{\tau}{r}$$

$$s = (2\pi r)n$$

$$W_{sh} = Fs = \left(\frac{\tau}{r}\right)(2\pi rn) = 2\pi n\tau$$

$$POWER = \frac{Work}{Time} \rightarrow \dot{W}_{sh} = 2\pi n\tau$$



$$F = mg \rightarrow W_g = \int_{z_1}^{z_2} mg \cdot dz = mg(z_2 - z_1) = \Delta PE$$

(۴) کار جاذبه (حاصل از شتاب ثقل)

$$F = \frac{d}{dt}(mV) = m \frac{dV}{dt}$$

$$dx = Vdt$$

$$W_a = \int m \frac{dV}{dt} \cdot dt = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \Delta KE$$

(۵) کار شتاب

فصل ۴: قانون اول ترمودینامیک

$$\oint \delta Q = \int \delta W$$

طی هر سیکل که سیستم می‌پیماید، انتگرال سیکلی گرما با انتگرال سیکلی کار متناسب است.

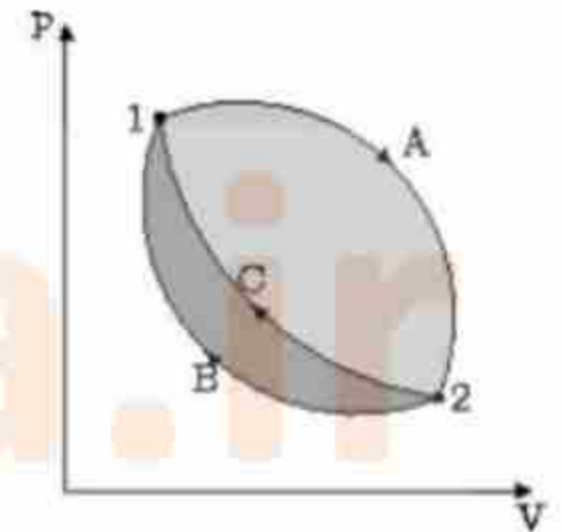
$$\int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2B}^{1B} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2B}^{1B} \delta W$$

$$\int_{1A}^{2A} \delta Q + \int_{2C}^{1C} \delta Q = \int_{1A}^{2A} \delta W + \int_{2C}^{1C} \delta W$$

$$\int_{2B}^{1B} \delta Q - \int_{2C}^{1C} \delta Q = \int_{2B}^{1B} \delta W - \int_{2C}^{1C} \delta W$$

$$\Rightarrow \int_{2B}^{1B} (\delta Q - \delta W) = \int_{2C}^{1C} (\delta Q - \delta W) =$$

$$\int (\delta Q - \delta W) = \int dE \Rightarrow \delta Q - \delta W = dE$$



مسیرهای طی شده حین انجام کار

$$dE = \delta Q - \delta W$$

قانون اول ترمودینامیک برای سیستم های بسته (جرم ثابت):

انرژی خالصی که به صورت کار یا حرارت به (یا از) سیستم منتقل می شود برابر افزایش (یا کاهش) خالص انرژی کل سیستم است.

$$Q - W = \Delta E$$



$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$mg(Z_2 - Z_1) = \Delta PE$$

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \Delta KE$$

رابطه ی اول ترمودینامیک برای یک چرخه به صورت زیر بیان می شود:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 0$$

$$Q - W = 0 \quad (kj)$$

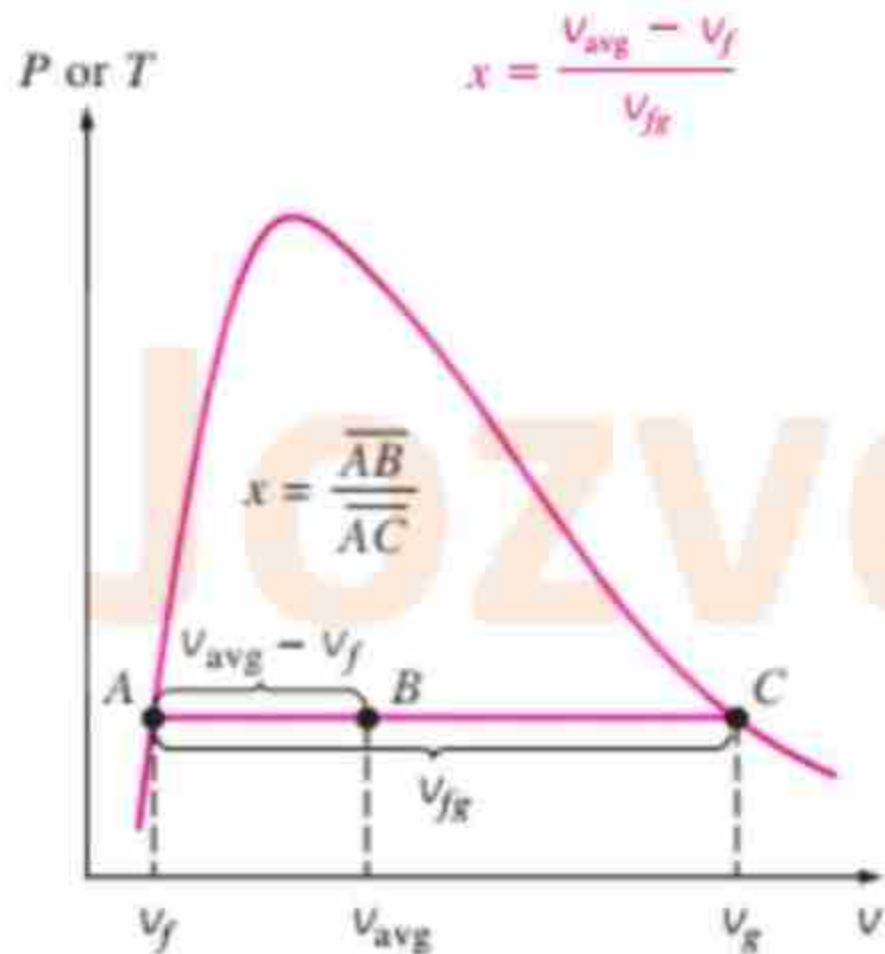
Stationary Systems

$$z_1 = z_2 \rightarrow \Delta PE = 0$$

$$V_1 = V_2 \rightarrow \Delta KE = 0$$

$$\Delta E = \Delta U$$

یادآوری از جلسه دوم:



$$V = V_f + V_g$$

$$V = mV \longrightarrow m_t v_{avg} = m_f v_f + m_g v_g$$

$$m_f = m_t - m_g \longrightarrow m_t v_{avg} = (m_t - m_g) v_f + m_g v_g$$

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

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

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

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

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

انرژی داخلی

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

آنالتپی

تحلیل مسائل :

۱) ترسیم شکل و انتخاب سیستم به کمک مرز سیستم (جرم کنترل)

۲) شناسایی حالت‌های ۱ و ۲

۳) پروسه‌ای که طی شده در مورد آن بحث شود.

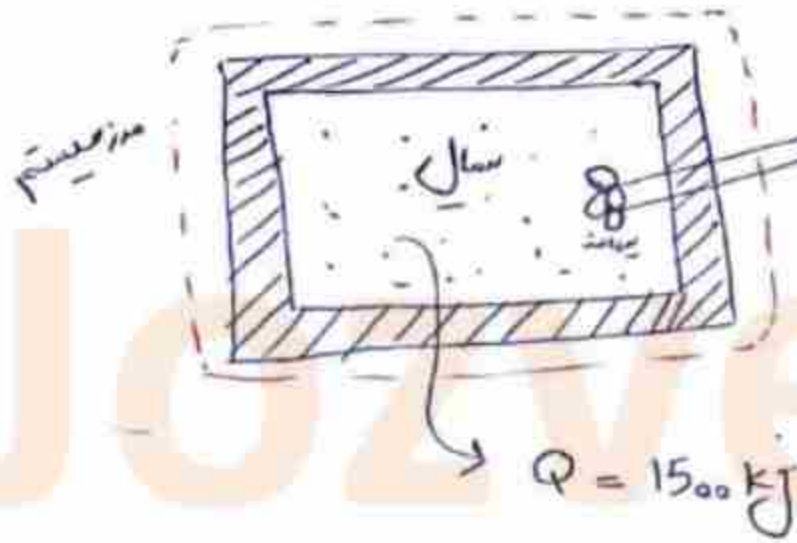
۴) کشیدن دیاگرام پروسه‌ها

(T-V)

(P-V)

سوال ۱

یک تانک شامل سیال سردی است که به کار داده شده به 5.9% است و صادرات
 انتقال یافته از تانک 1500 kJ می باشد. تانک و سیال درون آن را یک سیستم در نظر بگیرید.
 تغییر انرژی درونی این سیستم را حساب کنید.



تانک و سیال سردی =

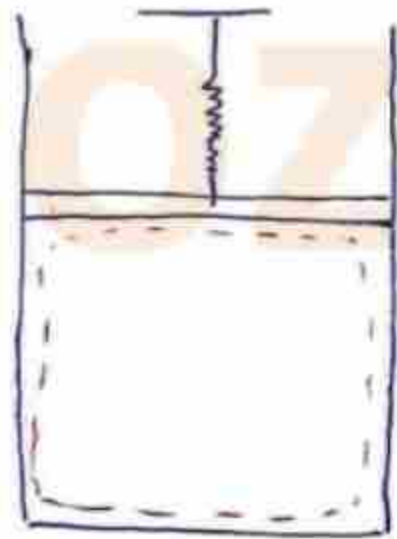
$$Q_{12} - W_{12} = \Delta E = \cancel{\Delta KE_{12}} + \cancel{\Delta PE_{12}} + \Delta U$$

$$Q_{12} - W_{12} = U_2 - U_1 + \frac{1}{2} m (\cancel{v_2^2 - v_1^2}) + mg (\cancel{z_2 - z_1})$$

$$\underbrace{Q_{12}}_{12} - \underbrace{W_{12}}_{12} = \Delta U = U_2 - U_1$$

$$-1500 - (-5.9) = \Delta U \Rightarrow \Delta U = 359$$

سیلندری شامل نیم کیلوگرم آمونیاک -20°C با کیفیت 25٪ می باشد، آمونیاک حرارت داده می شود تا زمانی آن به 20°C برسد، در این حالت حجم آن 1.41 برابر شده است، فشار نهایی و کار انجام شده توسط آمونیاک چقدر است؟



آمونیاک حالت ①

$$-20^{\circ}\text{C}$$

$$کیفیت = 25\% = x_1$$

جبرل اشباع امونیاک $\rightarrow T = -20^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{\text{Sat}} = 190.2 \text{ kPa}$

$$v_f = 0.001504 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \quad v_{fg} = 0.62184 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_1 = v_f + x_1 v_{fg} \Rightarrow 0.001504 + 0.25 \times 0.62184 = 0.156964 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_1 = m v_1 = 0.5 \times 0.156964 = 0.078482 \text{ m}^3 *$$

$$V_2 = 1.41 V_1 = 1.41 \times 0.078482 = 0.11066 \text{ m}^3 * \rightarrow v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0.11066}{0.5} = 0.22132 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\textcircled{2} \begin{cases} T_2 = 20^{\circ}\text{C} \\ v_2 = 0.22132 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{cases}$$

\Rightarrow جبرل اشباع

$$v_f = 0.001638 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

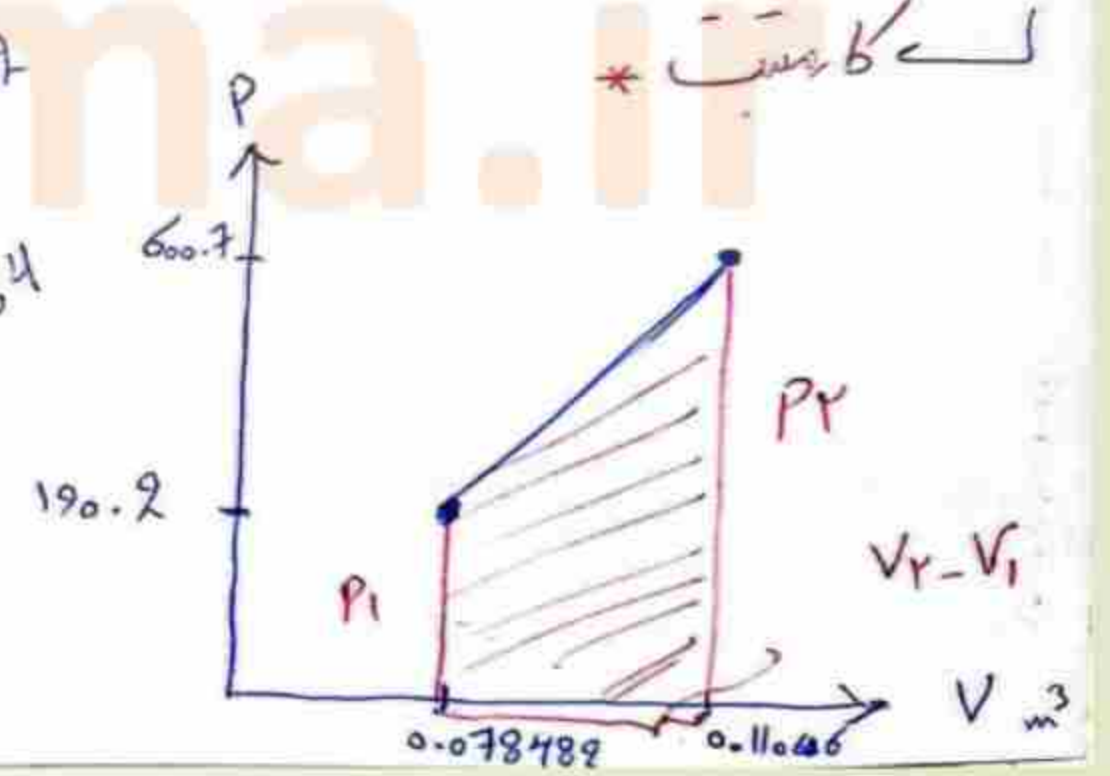
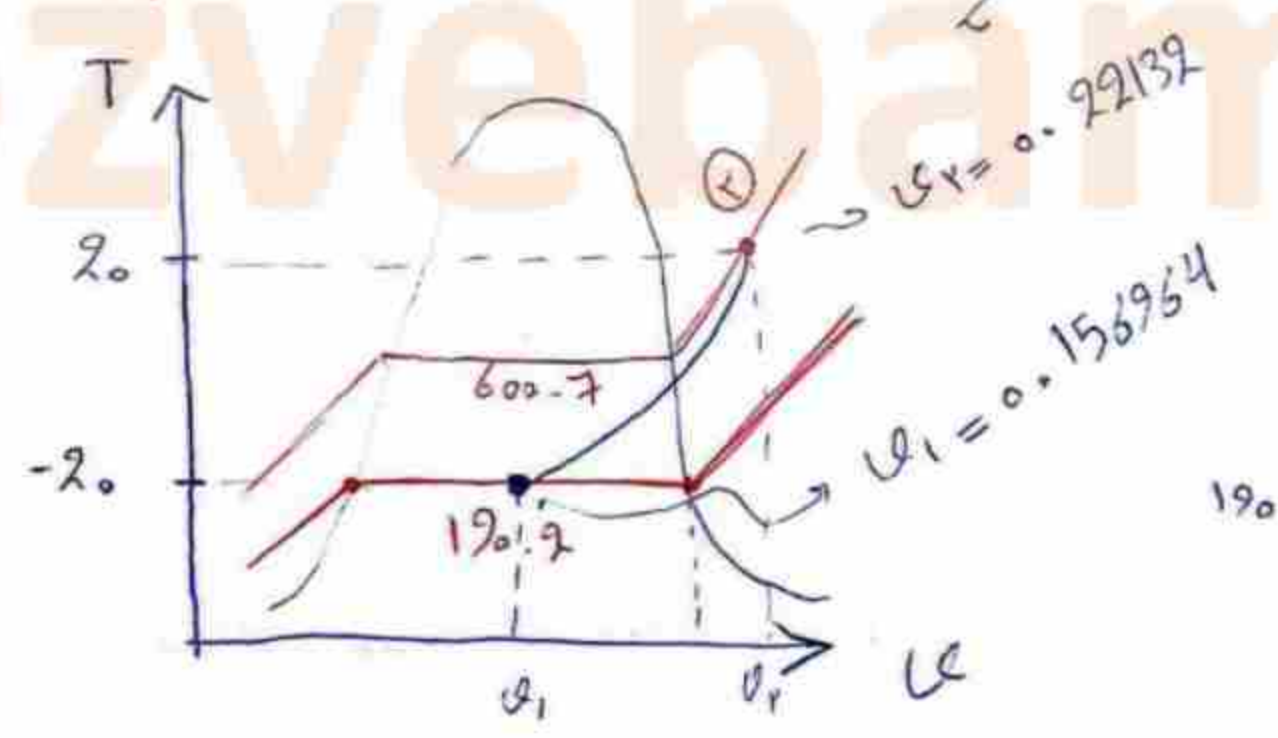
$$v_g = 0.14922 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$\rightarrow v_2 > v_g$

کاملاً سبب

جدول سوپر هیپ $T = 20 \Rightarrow P = 600 \text{ kPa}$ $P_2 = ?$ $P = 800$ $\rightarrow P_2 = 600.7 \text{ kPa}$
 $u = 0.22154$ $u_2 = 0.22132$ $u = 0.16138$

$$w_{12} = \frac{P_1 + P_2}{2} (V_2 - V_1) = \frac{190.2 + 600.7}{2} (0.11066 - 0.78482) = 12.7 \text{ kJ}$$



* کابست

← برداری استقال یافته را محاسبه کنید.

قانون اول
ترمودینامیک

$$Q_{12} - W_{12} = \Delta E = \underbrace{U_2 - U_1}_{12.7 \text{ KJ}} + \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + mg(z_2 - z_1)$$

$m(u_2 - u_1)$

$$Q_{12} = W_{12} + m(u_2 - u_1) = 12.7 + 0.5 (1347.8 - 391.435) = \underline{\underline{490.9 \text{ KJ}}}$$

حدود انشعاب هوای سرد

$$T = -20 \rightarrow u_f = 38.76$$

$$u_{fg} = 1210.7$$

$$x = 0.25$$

$$\rightarrow u_1 = u_f + x \cdot u_{fg} = \underline{\underline{391.435 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}}$$

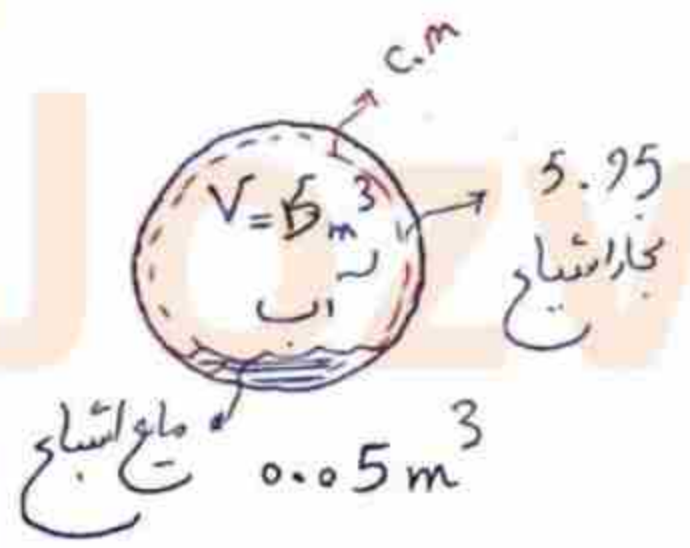
$$2) \begin{cases} T_2 = 20^\circ\text{C} \\ u_2 \rightarrow u_g \rightarrow \text{سوپرهیت} \end{cases}$$

در جدول سوپرهیت آمونیاک $T = 20^\circ\text{C}$

$p = 600 \text{ kPa}$, $p = 600.7 \text{ kPa}$, $p = 800 \text{ kPa}$
 $u = 1347.9$ $u = ?$ $u = 1335.8$

$$\Rightarrow u_2 = 1347.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

یک مخزن صلب آب به $V = 5 \text{ m}^3$ شامل مایع اشباع و بخار اشباع 4.95 m^3 بخار اشباع زیر فشار 100 kPa است. به آن حرارت می دهیم تا تمام آن به بخار اشباع تبدیل شود، مقدار حرارت لازم چقدر است؟



$\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$

$Q_{12} = m(u_2 - u_1) + W_{12}$

$(\Delta V = 0) \text{ صلب} \rightarrow W_{12} = 0 \Rightarrow$ حجم منجمد ماژش تغییر نکرد.

$Q_{12} = m(u_2 - u_1)$

حالت ①
اشباع $\Rightarrow \rho = 0.1 \text{ kPa} = 100 \text{ kPa} \rightarrow v_f = 0.001043 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

$$v_g = 1.69400 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{Liq}} = \frac{V_{\text{Liq}}}{v_f} = \frac{0.05 \text{ m}^3}{0.001043} = 47.94 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Vap}} = \frac{V_{\text{Vap}}}{v_g} = \frac{4.95}{1.69400} = 2.92 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow m_{\text{Total}} = m_{\text{Liq}} + m_{\text{Vap}} \Rightarrow$$

$$m = 50.86 \text{ kg}$$

$$u_f = 417.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad u_{fg} = 2088.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow u_1 = u_f + x_1 u_{fg} = 536.39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_1 = \frac{m_{\text{Vap}}}{m_{\text{Total}}} = \frac{2.92}{50.86} = 0.057 (5.7\%)$$

حالت 2) سوال این عدد در تبدیل بگردیم.

$$V_2 = V_1 = V_{\text{دب}} = 5 \text{ m}^3 \rightarrow u_2 = \frac{V_{\text{دب}}}{\text{دب m}} = \frac{5}{5.86} = 0.009837 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = v_g$$

تمام این به بخار استیج تبدیل شود.

جدول استیج:

$P = 2000 \text{ kPa}$	$u_g = 0.009963 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$u_g = 2600.26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
P_2	0.009837	$u_2 = ?$
$P = 2250 \text{ kPa}$	$u_g = 0.008875 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$u_g = 2601.98$

$$\frac{0.009837 - 0.009963}{0.008875 - 0.009963} = \frac{u_2 - 2600.26}{2601.98 - 2600.26} = \frac{P_2 - 2000}{2250 - 2000} \Rightarrow$$

$$P_2 = 2030.3 \text{ kPa}, \quad u_2 = u_g = 2600.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \text{مانند اول} \Rightarrow Q_{12} = m(u_2 - u_1) = 5.86 (2600.4 - 536.39) = \underline{\underline{1.4975.54 \text{ kJ}}}$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$P_1 = P_2$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \quad \rightarrow \quad {}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + P_2 V_2 - P_1 V_1$$

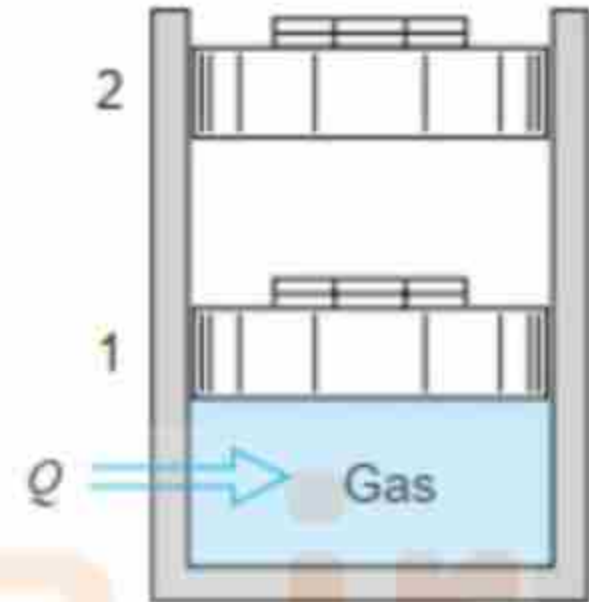
$$= (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1)$$

$$H \equiv U + PV$$



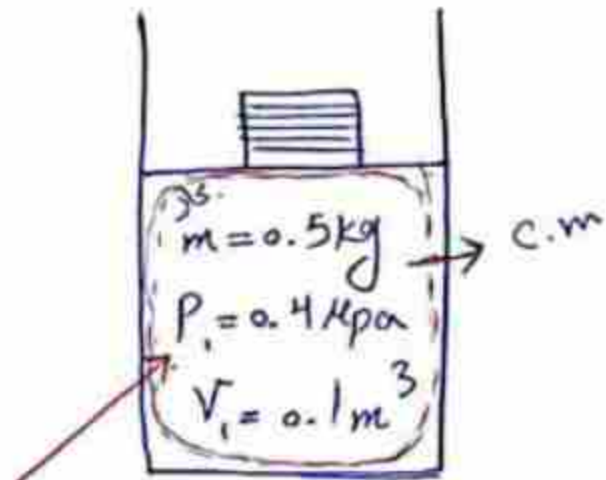
$$h \equiv u + Pv$$

$${}_1Q_2 = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1)$$



۲) سیلندر - پیستونی به حجم $0/1$ مترمکعب حاوی $0/5$ کیلوگرم بخار آب و با فشار $0/4$ مگا پاسکال است. در یک پروسه فشار ثابت حرارت به بخار منتقل می شود و دمای آن به 300 درجه سانتیگراد می رسد.

مقدار انتقال حرارت و کار این فرآیند را حساب کنید.



$$\textcircled{1} \begin{cases} V_1 = 0.1 \text{ m}^3 \\ P_1 = 0.4 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\textcircled{2} \begin{cases} P_2 = 0.4 \text{ MPa} \\ T_2 = 300^\circ \text{C} \end{cases}$$

فرضیات $\Rightarrow P_1 = P_2$

$$1) \begin{cases} P_1 = 0.4 \text{ MPa} = 400 \text{ kPa} \\ v_1 = \frac{V_1}{m_1} = \frac{0.1 \text{ m}^3}{0.5 \text{ kg}} = 0.2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{cases}$$

جدول استخراج A-5

$$\begin{cases} v_f = 0.001084 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ v_{fg} = 0.46138 \end{cases}$$

$$x_1 = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.2 - 0.001084}{0.46138} = 0.43 = \boxed{43\%}$$

$$h = h_f + x h_{fg} = 604.66 + 0.43 \times 2133.4 = 1521.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

2 حالت 2 $\left\{ \begin{array}{l} P = 400 \text{ kPa} \xrightarrow{A-5} T_{\text{sat}} = 143.61^\circ\text{C} \\ T = 300^\circ\text{C} \end{array} \right.$

$$\boxed{T > T_{\text{sat}} \quad \text{سوپرهیت}}$$

A-6 $\left\{ \begin{array}{l} P = 400 \text{ kPa} \\ T = 300^\circ\text{C} \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} v_2 = 0.65484 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_2 = 3066.75 \text{ kJ/kg} \end{array}$

مقدار برصایا انتقال حرارت:

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) = 0.5(3066.75 - 1524) = \underline{+771.03 \text{ kJ}}$$

مقدار کار انجام شده:

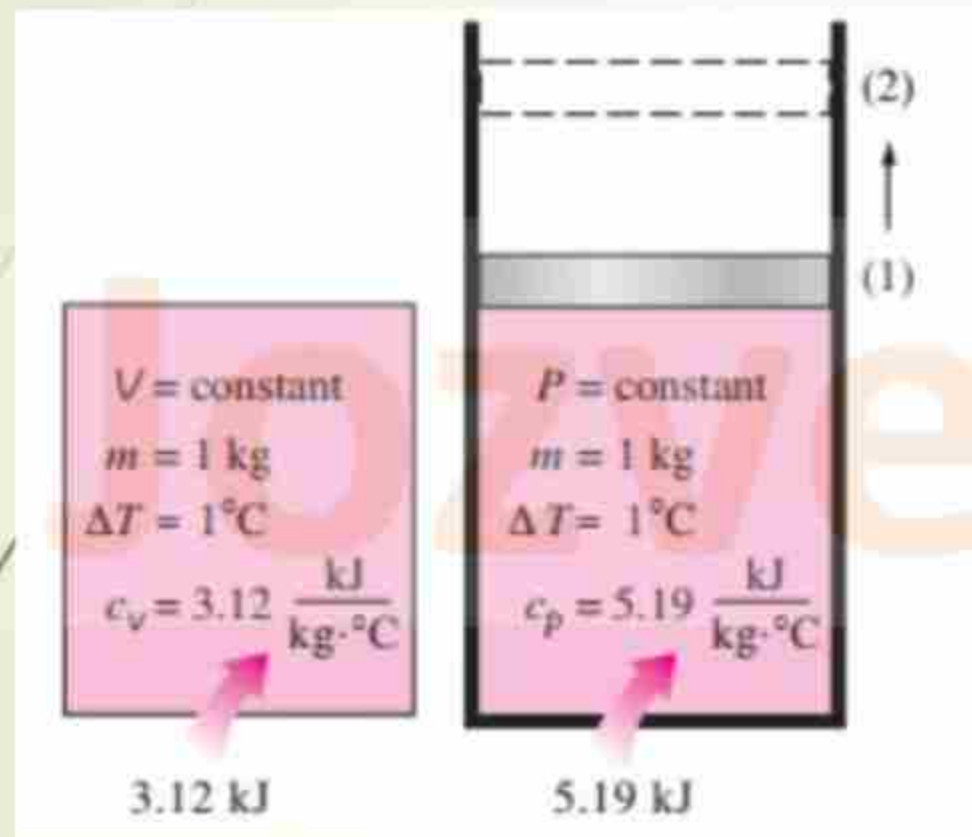
$$w_{12} = \int_1^2 p dV = p(v_2 - v_1) = pm(v_2 - v_1)$$

$$w_{12} = 400 \times 0.5 \times (0.65484 - 0.2) = \underline{+91 \text{ kJ}}$$

کار سیستم روی محیط (+)

حرارت مخصوص (گرمای ویژه)

مقدار گرمایی که لازم است تا دمای مایع یا گاز را یک درجه سانتیگراد افزایش دهیم.



گرمای ویژه در حجم ثابت C_v

گرمای ویژه در فشار ثابت C_p

گرمای ویژه

همواره C_p از C_v بزرگتر است.

دیدگاه ترمودینامیکی گرمای ویژه

گرمای ویژه در حجم ثابت

$$\delta q - \delta W = du$$

$$C_v dT = du \quad \rightarrow \quad C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$\delta q - \delta W = du$$

$$W_b + \Delta u = \Delta h \quad \rightarrow \quad C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

گرمای ویژه در فشار ثابت

می توان نتیجه گرفت که C_v به تغییرات انرژی داخلی مربوط است و C_p به تغییرات انتالپی مربوط است.

نکته در مورد جامدات و مایع‌ها ←

تغییرات حجمی ناچیز

A-4

A-3

$$h = u + pv$$

$$dh = du + p \cancel{dv} + v \cancel{dp}$$

$$dh = du$$

$$C_p = C_v = C$$

$$dh = du = C dT$$

$$\Delta h = C \Delta T$$

$$\Delta u = C \Delta T$$

گرمای ویژه در مبحث گاز ایده آل

گاز ایده آل گازی است که در آن

$$Pv=RT$$

$$h = u + pv$$

$$Pv=RT$$

$$h = u + RT$$

$$u = u(T)$$

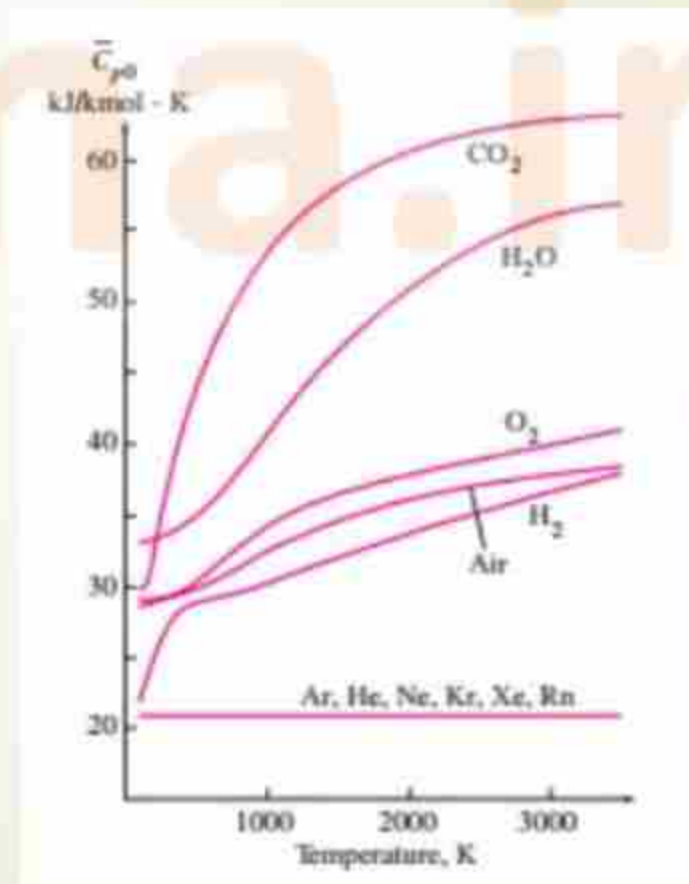
$$h = h(T)$$

$$C_{p0} = dh/dT$$

$$dh = C_{p0} dT$$

$$C_{v0} = du/dT$$

$$du = C_{v0} dT$$



$$dh = C_{p0} dT$$

انتگرال گیری

$$h_2 - h_1 = C_{p0} (T_2 - T_1)$$

A-5

(1) با فرض ثابت بودن C_{p0}

TABLE A.6

Constant-Pressure Specific Heats of Various Ideal Gases³

Gas	Formula	$C_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ (kJ/kg K)			
		C_0	C_1	C_2	C_3
Steam	H ₂ O	1.79	0.107	0.586	-0.20
Acetylene	C ₂ H ₂	1.03	2.91	-1.92	0.54
Air	—	1.05	-0.365	0.85	-0.39
Ammonia	NH ₃	1.60	1.4	1.0	-0.7
Argon	Ar	0.52	0	0	0
Butane	C ₄ H ₁₀	0.163	5.70	-1.906	-0.049
Carbon dioxide	CO ₂	0.45	1.67	-1.27	0.39
Carbon monoxide	CO	1.10	-0.46	1.0	-0.454
Ethane	C ₂ H ₆	0.18	5.92	-2.31	0.29
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.2	-4.65	-1.82	0.03
Ethylene	C ₂ H ₄	0.136	5.58	-3.0	0.63
Helium	He	5.193	0	0	0
Hydrogen	H ₂	13.46	4.6	-6.85	3.79
Methane	CH ₄	1.2	3.25	0.75	-0.71

(2) انتگرال گیری دقیق تر

C_{p0} تابعی از دما در جدول (A-5)

A-8 گازهای دیگر

هوا A-7

3) عبارتی به نام h_T تعریف میکنیم

$$h_2 - h_1 = h_{T2} - h_{T1}$$

$$u_T = h_T - RT$$

$$h = u + pv$$

$$h = u + RT$$

$$C_{Po} = C_{Vo} + R$$

$$dh = du + RdT$$

$$C_{Po} dT = C_{Vo} dT + RdT$$

$$C_{Po} - C_{Vo} = R$$

$$\bar{C}_{Po} - \bar{C}_{Vo} = \bar{R}$$

مطلوب است تغییر انتالپی 1 kg استیون در صورتی که دمای آن از 300 K به 1500 K می‌رسد.
 با فرض گاز ایده‌آل این مسئله را به دست آورید؟

③

راه حل ③

$$T_1 = 300 \Rightarrow h_{T_1} = 273.15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = 1500 \Rightarrow h_{T_2} = 1540.23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow h_2 - h_1 = 1267.08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

جواب: A-8 استیون

Nitrogen, Diatomic (N_2)
 $R = 0.2968 \text{ kJ/kg-K}$
 $M = 28.013 \text{ kg/kmol}$

Oxygen, Diatomic (O_2)
 $R = 0.2598 \text{ kJ/kg-K}$
 $M = 31.999 \text{ kg/kmol}$

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)
200	148.39	207.75	6.4250	129.84	181.81	6.0466
250	185.50	259.70	6.6568	162.41	227.37	6.2499
300	222.63	311.67	6.8463	195.20	273.15	6.4168
350	259.80	363.68	7.0067	228.37	319.31	6.5590
400	297.09	415.81	7.1459	262.10	366.03	6.6838
450	334.57	468.13	7.2692	296.52	413.45	6.7954
500	372.35	520.75	7.3800	331.72	461.63	6.8969
550	410.52	573.76	7.4811	367.70	510.61	6.9903
600	449.16	627.24	7.5741	404.46	560.36	7.0768
650	488.34	681.26	7.6606	441.97	610.86	7.1577
700	528.09	735.86	7.7415	480.18	662.06	7.2336
750	568.45	791.05	7.8176	519.02	713.90	7.3051
800	609.41	846.85	7.8897	558.46	766.33	7.3728
850	650.98	903.26	7.9581	598.44	819.30	7.4370
900	693.13	960.25	8.0232	638.90	872.75	7.4981
950	735.85	1017.81	8.0855	679.80	926.65	7.5564
1000	779.11	1075.91	8.1451	721.11	980.95	7.6121
1100	867.14	1193.62	8.2572	804.80	1090.62	7.7166
1200	957.00	1313.16	8.3612	889.72	1201.53	7.8131
1300	1048.46	1434.31	8.4582	975.72	1313.51	7.9027
1400	1141.35	1556.87	8.5490	1062.67	1426.44	7.9864
1500	1235.50	1680.70	8.6345	1150.48	1540.23	8.0649

راه حل 2 جدول A-6 توابع c_{p_0} بر حسب دما برای گازها،

$$h_2 - h_1 = \int c_{p_0}(T) dT$$

$$c_{p_0} = c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \quad \theta = \frac{T(\text{K})}{1000}$$

$$O_2 = 0.88, \quad c_1 = -0.0001, \quad c_2 = 0.54, \quad c_3 = -0.33$$

$$h_2 - h_1 = \int_{\theta=0.3}^{\theta=1.5} c_{p_0}(\theta) 1000 d\theta, \quad dT = 1000 d\theta$$

$$= \int_{0.3}^{1.5} (0.88 - 0.0001\theta + 0.54\theta^2 - 0.33\theta^3) 1000 d\theta$$

$$= 1000 \left[0.88\theta - \frac{0.0001\theta^2}{2} + \frac{0.54\theta^3}{3} - \frac{0.33\theta^4}{4} \right]_{0.3}^{1.5} = \underline{\underline{1241.544 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

TABLE A.6

Constant-Pressure Specific Heats of Various Ideal Gases

Gas	Formula	$C_{p,0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ (kJ/kg K)				$\theta = T(\text{Kelvin})/1000$
		C_0	C_1	C_2	C_3	
Steam	H ₂ O	1.79	0.107	0.586	-0.20	
Acetylene	C ₂ H ₂	1.03	2.91	-1.92	0.54	
Air	—	1.05	-0.365	0.85	-0.39	
Ammonia	NH ₃	1.60	1.4	1.0	-0.7	
Argon	Ar	0.52	0	0	0	
Butane	C ₄ H ₁₀	0.163	5.70	-1.906	-0.049	
Neon	Ne	1.03	0	0	0	
Nitric oxide	NO	0.98	-0.031	0.325	-0.14	
Nitrogen	N ₂	1.11	-0.48	0.96	-0.42	
Nitrous oxide	N ₂ O	0.49	1.65	-1.31	0.42	
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	-0.053	6.75	-3.67	0.775	
Oxygen	O ₂	0.88	-0.0001	0.54	-0.33	
Propane	C ₃ H ₈	-0.096	6.95	-3.6	0.73	
R-12*	CCl ₂ F ₂	0.26	1.47	-1.25	0.36	

$$c_{p_0} = \text{ثابت} \quad , \quad h_2 - h_1 = c_{p_0} \left(\frac{T_2}{1500} - \frac{T_1}{300} \right)$$

برای (7)

$$\text{جدول A-5} \rightarrow c_{p_0} = 0.922 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$h_2 - h_1 = 0.922 (1500 - 300) = 1106.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

TABLE A.5

Properties of Various Ideal Gases at 25°C, 100 kPa* (SI Units)

Gas	Chemical Formula	Molecular Mass (kg/kmol)	R (kJ/kg-K)	ρ (kg/m ³)	C_{p0} (kJ/kg-K)	C_{v0} (kJ/kg-K)	$k = \frac{C_p}{C_v}$
Steam	H ₂ O	18.015	0.4615	0.0231	1.872	1.410	1.327
Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	0.3193	1.05	1.699	1.380	1.231
Air	—	28.97	0.287	1.169	1.004	0.717	1.400
Ammonia	NH ₃	17.031	0.4882	0.694	2.130	1.642	1.297
Argon	Ar	39.948	0.2081	1.613	0.520	0.312	1.667
Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	2.407	1.716	1.573	1.091
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	1.775	0.842	0.653	1.289
Carbon monoxide	CO	28.01	0.2968	1.13	1.041	0.744	1.399
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	0.2765	1.222	1.766	1.490	1.186
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	46.069	0.1805	1.883	1.427	1.246	1.145
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.138	1.548	1.252	1.237
Helium	He	4.003	2.0771	0.1615	5.193	3.116	1.667
Hydrogen	H ₂	2.016	4.1243	0.0813	14.209	10.085	1.409
Methane	CH ₄	16.043	0.5183	0.648	2.254	1.736	1.299
Methanol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	1.31	1.405	1.146	1.227
Neon	Ne	20.183	0.4120	0.814	1.03	0.618	1.667
Nitric oxide	NO	30.006	0.2771	1.21	0.993	0.716	1.387
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	1.13	1.042	0.745	1.400
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	1.775	0.879	0.690	1.274
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	114.23	0.07279	0.092	1.711	1.638	1.044
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	1.292	0.922	0.662	1.393
Propane	C ₃ H ₈	44.094	0.1886	1.808	1.679	1.490	1.126

تمرین

سیلندر-پیستونی با حجم اولیه ۰/۱ مترمکعب داریم. شامل نیتروژن، در فشار ۱۵۰ کیلوپاسکال و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار دارد. پیستون را با نیرویی به سمت پایین حرکت می‌دهیم و نیتروژن را تا **فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد** فشرده می‌کنیم. در خلال پروسه حرارت از نیتروژن به بیرون منتقل می‌شود و ۲۰ کیلوژول **کار روی نیتروژن** انجام می‌شود. مقدار انتقال حرارت چقدر است؟

State 1: $V_1 = 0.1 \text{ m}^3$
 $P_1 = 150 \text{ Kpa}$
 $T_1 = 25 \text{ C}$

State 2: $P_2 = 1 \text{ Mpa}$
 $T_2 = 150 \text{ C}$

Process: A-5

Mass calculation: $m = \frac{PV}{RT} = \frac{150 \text{ kPa} \times 0.1 \text{ m}^3}{0.2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times 298.15 \text{ K}} = 0.1695 \text{ kg}$

Temperature conversion: $25 + 273.15$

Energy equation 1: ${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + {}_1W_2$

Energy equation 2: ${}_1Q_2 = mC_{v,0}(T_2 - T_1) + {}_1W_2$

Calculation: $= 0.1695 \text{ kg} \times 0.745 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (150 - 25) \text{ K} - 20.0$

Result: $= 15.8 - 20.0 = -4.2 \text{ kJ}$

$$Tr = \frac{T1}{Tcr} = \frac{25+273.15}{126.2} = 2.36 > 2$$

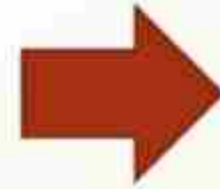
$$pr = \frac{p1}{Pcr} = \frac{150}{3390} = 0.044 \ll 1$$



فرض گاز ایده‌آل
درست است

$$Tr = \frac{T2}{Tcr} = \frac{150+273.15}{126.2} = 3.35 > 2$$

$$pr = \frac{p2}{Pcr} = \frac{1000}{3390} = 0.29 < 1$$



فرض گاز ایده‌آل
درست است

Jozvebama.ir

معادله‌ی قانون اول به صورت معادله نرخ (نرخ یعنی در واحد زمان)

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = \delta Q - \delta W$$



$$\frac{\Delta U}{\delta t} + \frac{\Delta KE}{\delta t} + \frac{\Delta PE}{\delta t} = \frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta W}{\delta t}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\delta t} = \frac{dU}{dt}, \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(KE)}{\delta t} = \frac{d(KE)}{dt}, \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(PE)}{\delta t} = \frac{d(PE)}{dt}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\delta t} = \dot{Q} \quad (\text{the heat transfer rate})$$

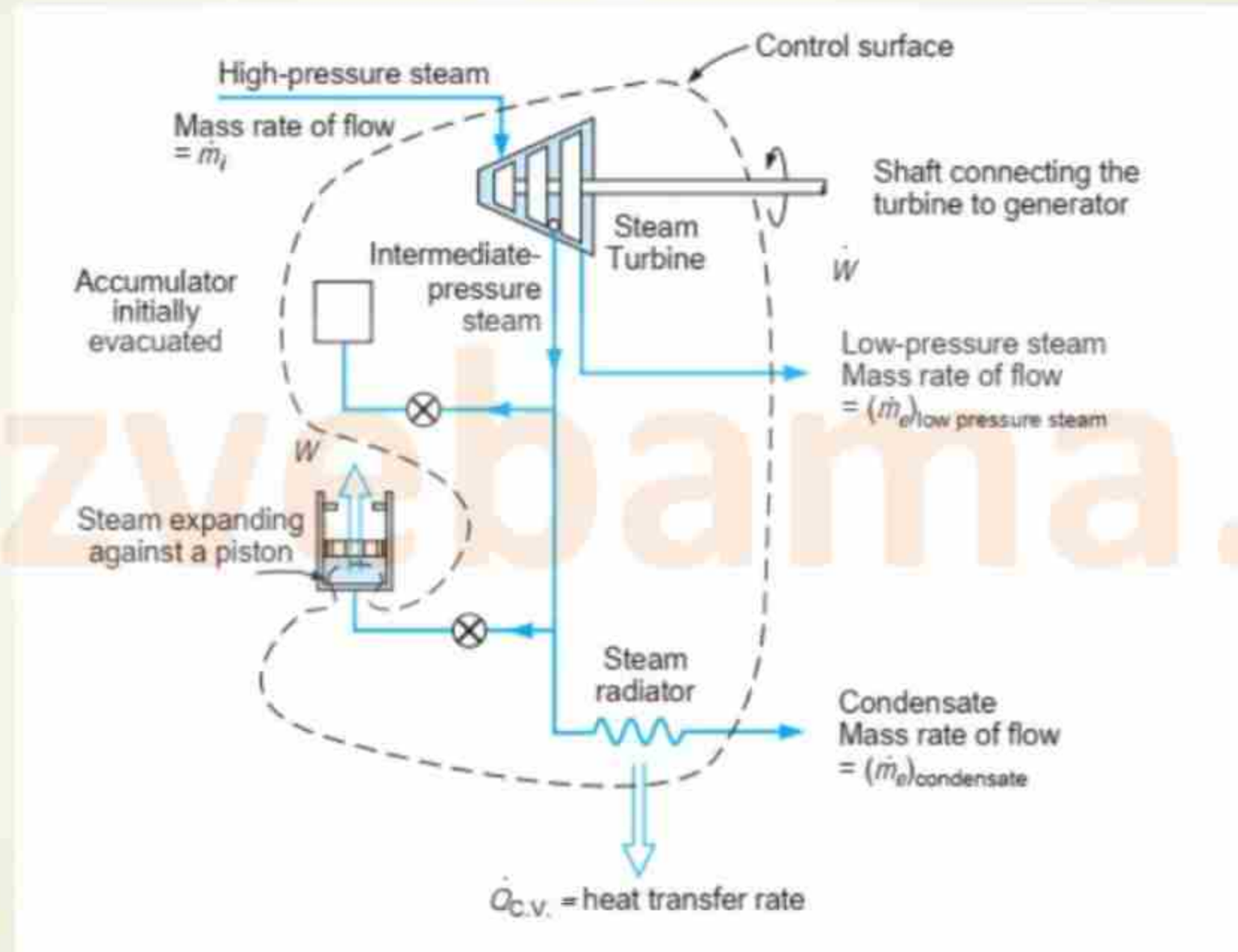
$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\delta t} = \dot{W} \quad (\text{the power})$$



$$\frac{dU}{dt} + \frac{d(KE)}{dt} + \frac{d(PE)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

فصل ۵: قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل (سیستم باز)

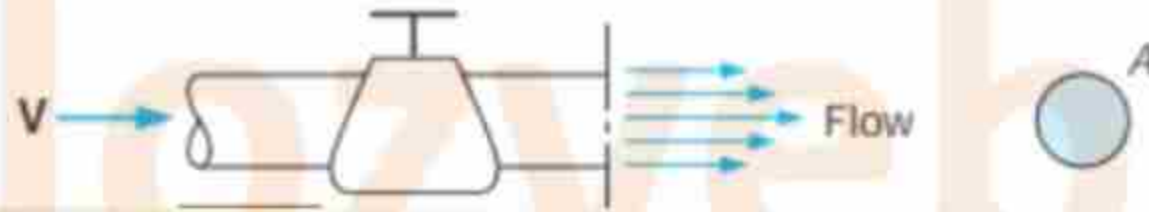


بقای جرم

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_I - \sum \dot{m}_e$$

مجموع جرم خروجی - مجموع جرم ورودی

$$m_{c.v.} = \int \rho dV = \int (1/v) dV = m_A + m_B + m_C + \dots$$



مقدار حجم سیالی که در زمان Δt از سطح A می‌گذرد $= A\Delta x = AV\Delta t$

مقدار حجم سیالی که در واحد زمان از سطح A می‌گذرد $= AV\Delta t / \Delta t = VA$

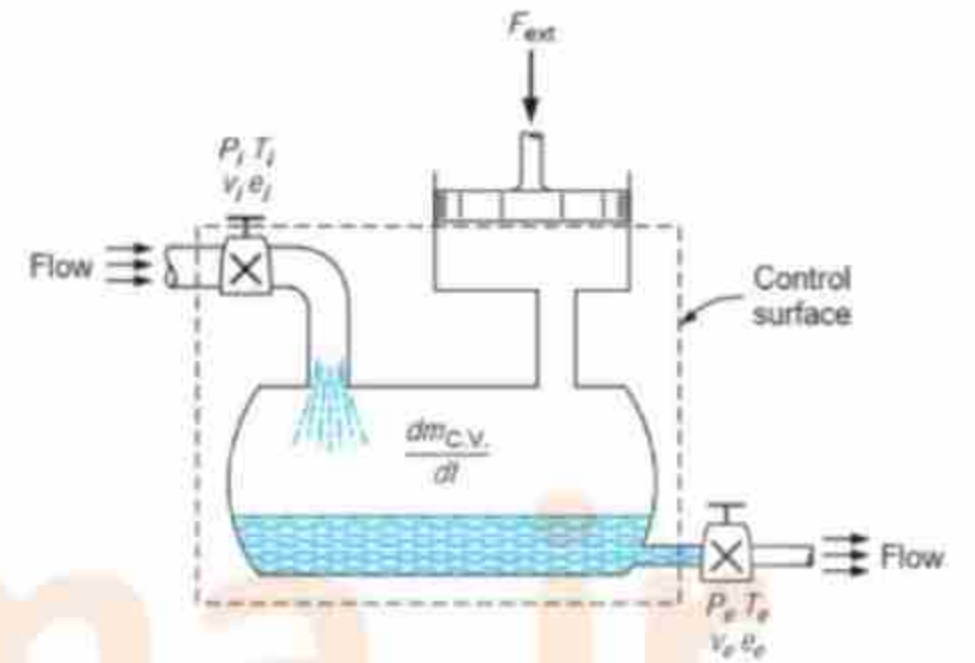
دبی حجمی

\dot{V}

مقدار جرم سیالی که در واحد زمان از سطح A می‌گذرد $= \rho VA = VA/v$

دبی جرمی

\dot{m}



مثال

در یک لوله‌ای به قطر ۲۰ سانتی متر هوا با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه جریان دارد. دما و فشار هوا به ترتیب ۲۵ درجه سانتیگراد و ۱۵۰ کیلوپاسکال است. دبی جرمی را محاسبه کنید.

$$\dot{m} = \mathbf{V}A/v$$

با فرض گاز ایده آل
برای هوا

$$v = \frac{RT}{P} = \frac{0.287 \text{ kJ/kg K} \times 298.2 \text{ K}}{150 \text{ kPa}} = 0.5705 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$273.2+25$$

$$A = \frac{\pi}{4}(0.2)^2 = 0.0314 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = \mathbf{V}A/v = 0.1 \text{ m/s} \times 0.0314 \text{ m}^2 / 0.5705 \text{ m}^3/\text{kg} = 0.0055 \text{ kg/s}$$

$$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

$$\frac{dE_{C.M.}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

معادله نرخ برای جرم کنترل
(سیستم بسته)

$$m_i = m \cdot (u_i + V_i^2/2 + gZ_i)$$

انرژی جرم جریان ورودی

برای حجم کنترل:

$$m_e = m \cdot (u_e + V_e^2/2 + gZ_e)$$

انرژی جرم جریان خروجی

سرعت * نیرو = توان

توان

$$= PAV = P v AV/v = m \cdot Pv$$

کار جرم جریان

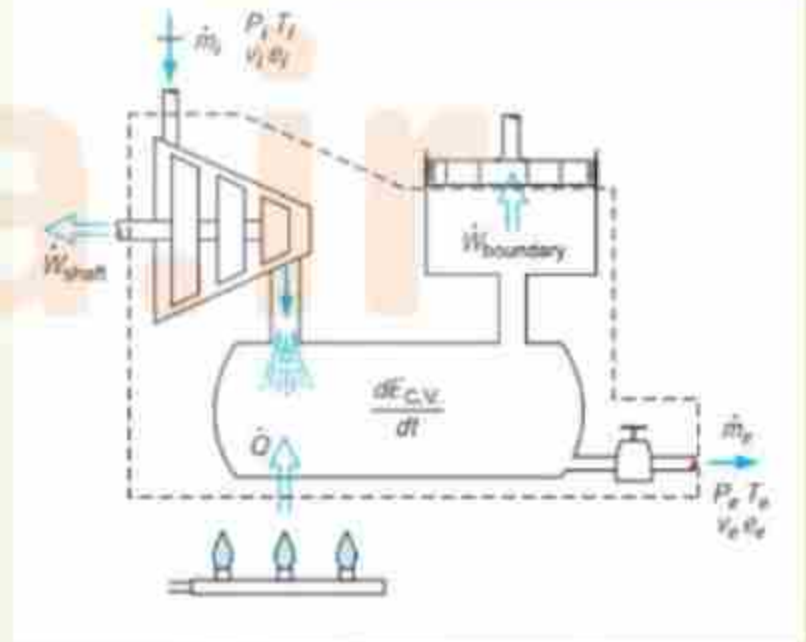
کار جرم جریان

$$m_i \cdot p_i v_i$$

کار-

$$m_e \cdot p_e v_e$$

کار+



$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \dot{m}_i e_i - \dot{m}_e e_e + \dot{W}_{\text{flow in}} - \dot{W}_{\text{flow out}}$$

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \dot{m}_i (e_i + P_i v_i) - \dot{m}_e (e_e + P_e v_e)$$

$$h \equiv u + Pv$$

$$= \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} \mathbf{v}_i^2 + gZ_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \mathbf{v}_e^2 + gZ_e \right)$$

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} \mathbf{v}_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \mathbf{v}_e^2 + gZ_e \right)$$

پروسه های حالت دائم (steady state) ←

پروسه هایی هستند که طی آنها هیچگونه تغییراتی با زمان نداریم.

مسائل حرارت دائم:

(۱) حجم کنترل نسبت به مختصات تغییر ندارد (دستگاه مختصات چسبیده به حجم کنترل)

(۲) حالت جرم در هیچ نقطه‌ای از حجم کنترل نسبت به زمان تغییر نمی‌کند.

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = 0$$

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_l - \sum \dot{m}_e \rightarrow \sum \dot{m}_l = \sum \dot{m}_e$$

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = 0$$

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_l \left(h_l + \frac{1}{2} \mathbf{v}_l^2 + gZ_l \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \mathbf{v}_e^2 + gZ_e \right)$$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_l \left(h_l + \frac{\mathbf{v}_l^2}{2} + gZ_l \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.}$$

۳) همانند جرم که از سطح کنترل عبور میکند شارجرم و حالت آن در هر نقطه از سطح کنترل با جریان تغییر نمی کند. همچنین شدت گرما و شدت کار (توان) با زمان، ثابت است.

قانون پابستگی

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

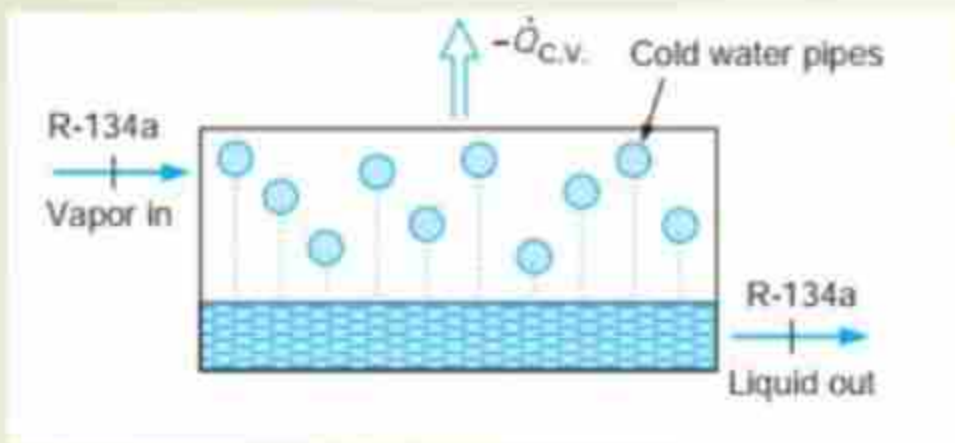
$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + W_{c.v.}$$

$$q = \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{\dot{m}}$$

$$w = \frac{W_{c.v.}}{\dot{m}}$$

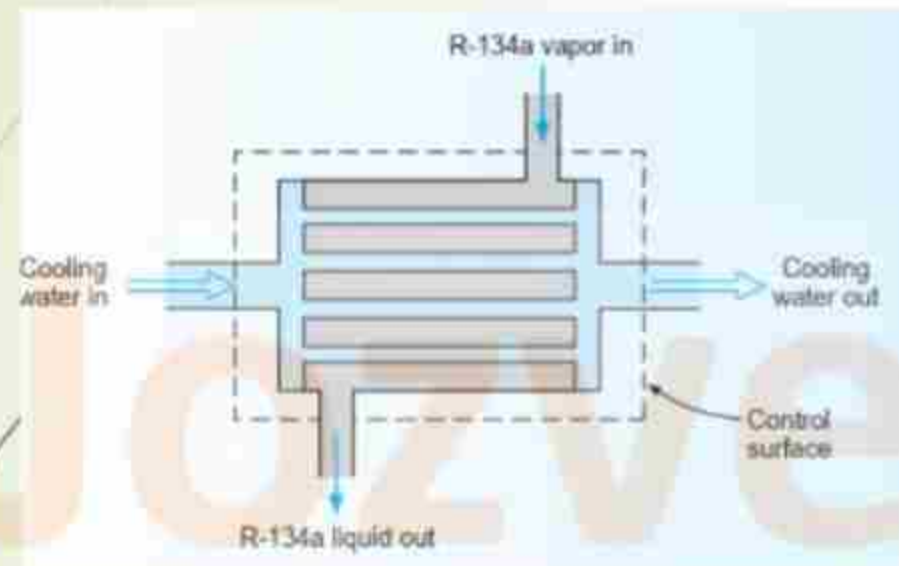
$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e + w$$

مثال‌هایی از پروسه‌های حالت دائم



مبدل‌های حرارتی (Heat exchanger)

وسیله‌ای است برای تبادل حرارت بین دو جریان بکار می‌رود.
(بین مبرد و آب)



فرض: مبدل عایق $Q_{cv}=0$, $W_{cv}=0$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + W_{c.v.}$$

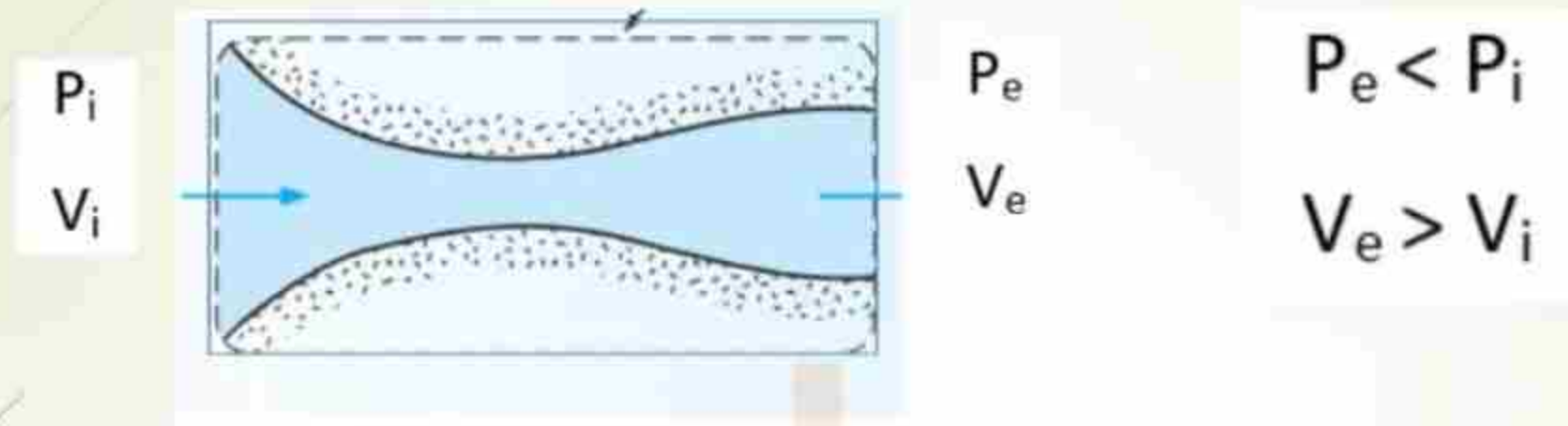
با صرف نظر از تغییرات
جنبشی و پتانسیل

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_r (h_i)_r + \dot{m}_w (h_i)_w = \dot{m}_r (h_e)_r + \dot{m}_w (h_e)_w$$

نازل (Nozzle)

وسیله ای برای افزایش انرژی جنبشی به کاهش فشار. (تبدیل فشار به سرعت)



دیفیوزر (Diffuser)

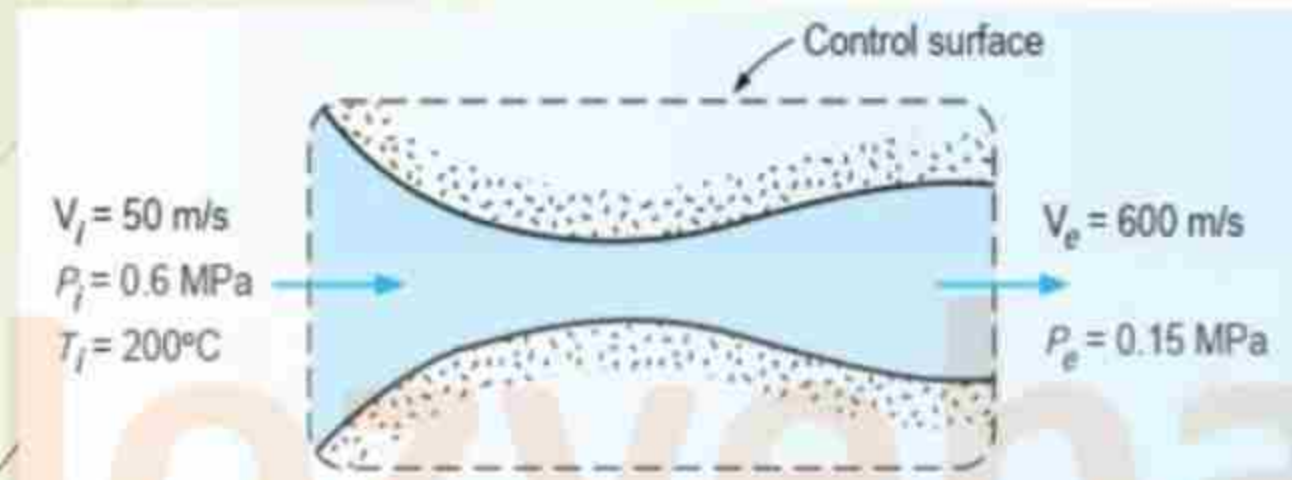
وسیله ای برای افزایش فشار به کاهش سرعت (انرژی جنبشی). (تبدیل سرعت به فشار) عکس بالا

$$P_e > P_i$$

$$V_e < V_i$$

مثال:

بخار آب ۰/۶ مگاپاسکال و ۲۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه وارد نازل می شود و با فشار ۰/۱۵ مگاپاسکال و با سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه نازل را ترک می کند. حالت خروجی را تعیین کنید. نازل را عایق در نظر بگیرید.



Process Steady-state.

$$\dot{Q}_{c.v.} = 0$$

$$\dot{W}_{c.v.} = 0$$

$$PE_f \approx PE_e$$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.}$$

$$h_i + \frac{V_i^2}{2} = h_e + \frac{V_e^2}{2}$$

$$h_e = 2850.1 + \left[\frac{(50)^2}{2 \times 1000} - \frac{(600)^2}{2 \times 1000} \right] \frac{\text{m}^2/\text{s}^2}{\text{J/kJ}} = 2671.4 \text{ kJ/kg}$$

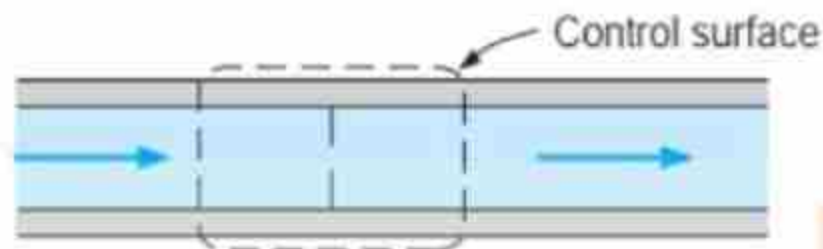
$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$2671.4 = 467.1 + x_e 2226.5$$

$$x_e = 0.99$$

در سطح مقطع جریان یک مانع ایجاد می کنند که باعث کاهش فشار می شود.

$$P_e < P_i$$



$$\cancel{Q_{c.v.}} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \cancel{W_{c.v.}}$$

$$h_i = h_e$$

بقای جرم

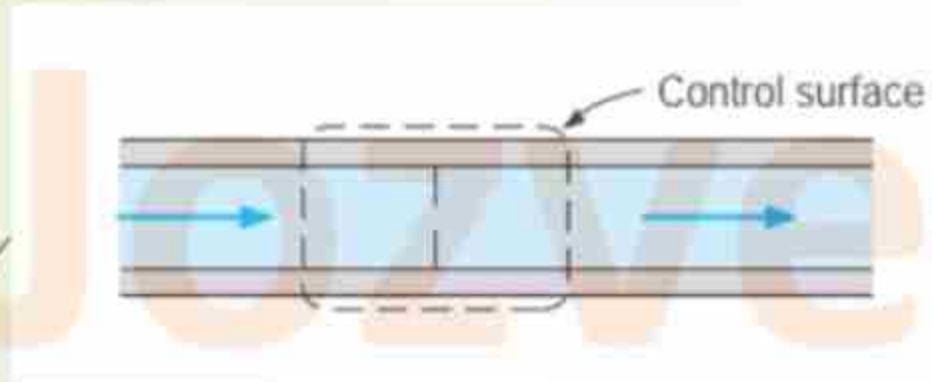
$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

پروسه اختناق پروسه ای است که در ورود تا خروج، آنتالپی در آن ثابت می ماند

$$Q_{cv}=0, W_{cv}=0$$

مثال:

در فرآیند زیر که در آن آمونیاک مبرد است با فشار ۱.۵ مگاپاسکال و دمای ۳۵ درجه سانتیگراد وارد شیر انبساط می‌شود. اگر فشار در هنگام خروج از شیر از انبساط به ۲۹۱ کیلوپاسکال باشد، کیفیت آمونیاک را در خروج تعیین کنید.



Control volume: Expansion valve or capillary tube.

Inlet state: P_i , T_i known; state fixed.

Exit state: P_e known.

Process: Steady-state.

Model: Ammonia tables.

امونیا : $P = 1.5 \text{ Mpa} = 1500 \text{ kpa}$

① $T = 35^\circ\text{C} = P_{\text{Sat}} = 1350.4 \text{ kpa} \rightarrow P_{\text{Sat}} < P$ ایزوسترده

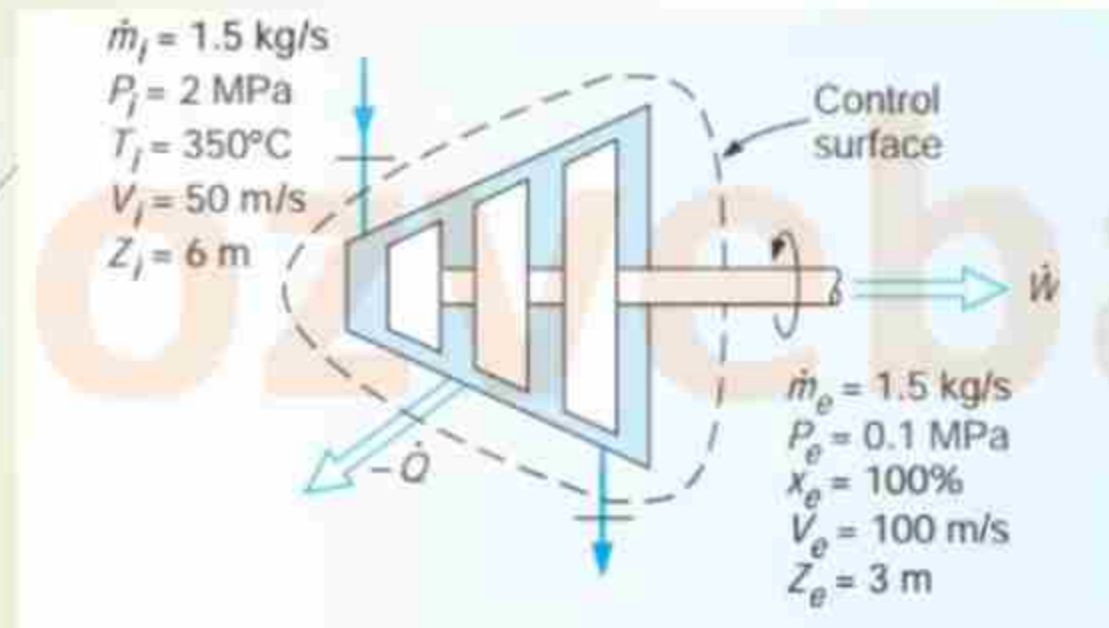
$h_i = h_f$ | $G I = 35^\circ\text{C}$ $= 346.80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow$ در این دما $\Rightarrow h_e = h_i = 346.80$

② $h_e = 346.80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
 $P_e = 291 \text{ kpa} \Rightarrow$ اشباع $h_g < h_e < h_{g'}$
 \downarrow \downarrow
 134.41 1430.8

$x_e = \frac{h - h_f}{h_{g'} - h_f} \Rightarrow x_e = \frac{346.80 - 134.41}{1430.8 - 134.41} = 0.164 \text{ (16.4\%)}$

در توربین چرخش پره باعث می شود انرژی جنبشی ماده (سیال) به انرژی مکانیکی تبدیل شود، سپس به الکتریسیته تبدیل گردد.

(وسیله ای است که انرژی را از سیال می گیرد)



	Inlet Conditions	Exit Conditions
Pressure	2.0 MPa	0.1 MPa
Temperature	350°C	
Quality		100%
Velocity	50 m/s	100 m/s
Elevation above reference plane	6 m	3 m
$g = 9.8066 \text{ m/s}^2$		

Determine the power output of the turbine.

Control volume: Turbine (Fig. 6.9).

Inlet state: Fixed (above).

Exit state: Fixed (above).

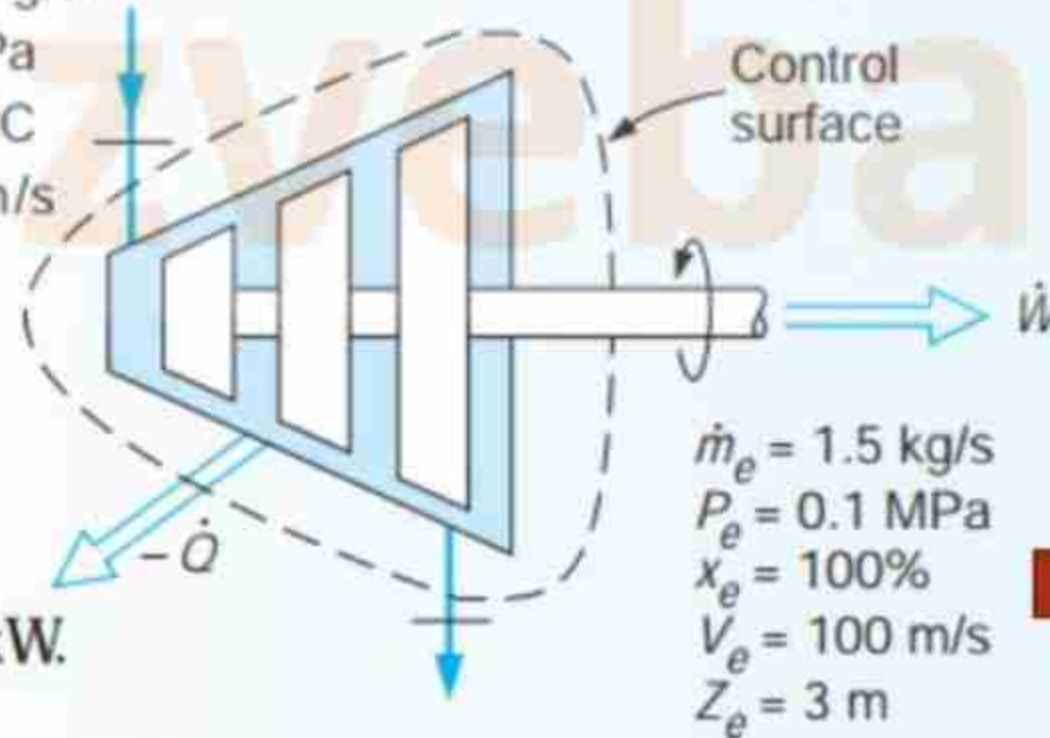
Process: Steady-state.

Model: Steam tables.

$h_i = 3137.0 \text{ kJ/kg}$

$\dot{m}_i = 1.5 \text{ kg/s}$
 $P_i = 2 \text{ MPa}$
 $T_i = 350^\circ\text{C}$
 $V_i = 50 \text{ m/s}$
 $Z_i = 6 \text{ m}$

8.5 kW.



$\dot{m}_e = 1.5 \text{ kg/s}$
 $P_e = 0.1 \text{ MPa}$
 $x_e = 100\%$
 $V_e = 100 \text{ m/s}$
 $Z_e = 3 \text{ m}$

$h_e = 2675.5 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \dot{m} \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.}$$

$$\dot{Q}_{c.v.} = -8.5 \text{ kW}$$

$$\frac{v_i^2}{2} = \frac{50 \times 50}{2 \times 1000} = 1.25 \text{ kJ/kg}$$

$$gZ_i = \frac{6 \times 9.8066}{1000} = 0.059 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{v_e^2}{2} = \frac{100 \times 100}{2 \times 1000} = 5.0 \text{ kJ/kg}$$

$$gZ_e = \frac{3 \times 9.8066}{1000} = 0.029 \text{ kJ/kg}$$

$$-8.5 + 1.5(3137 + 1.25 + 0.059) = 1.5(2675.5 + 5.0 + 0.029) + \dot{W}_{c.v.}$$

$$\dot{W}_{c.v.} = -8.5 + 4707.5 - 4020.8 = 678.2 \text{ kW}$$

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e + w$$

$$q = \frac{-8.5}{1.5} = -5.667 \text{ kJ/kg}$$

$$-5.667 + 3137 + 1.25 + 0.059 = 2675.5 + 5.0 + 0.029 + w$$

$$w = 452.11 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{c.v.} = 1.5 \text{ kg/s} \times 452.11 \text{ kJ/kg} = 678.2 \text{ kW}$$

پروسه های گذرا (TRANSIENT)

پروسه هایی هستند که طی آنها تغییراتی با زمان داریم.

مسائل گذرا:

(۱) حجم کنترل نسبت به مختصات ساکن است (سرعت‌هایی که نسبت به دستگاه مختصات اندازه‌گیری می‌شود همان سرعت نسبت به حجم کنترل است)

(۲) حالت درون حجم کنترل می‌تواند نسبت به زمان تغییر کند ولی نسبت به مکان یکنواخت است.

(۳) حالت جرم ورودی و خروجی به حجم کنترل با زمان ثابت است. (هرچند مقدار دبی آن می‌تواند با زمان تغییر کند)

$$\frac{dm_{C.V.}}{dt} + \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_i = 0 \quad \rightarrow \quad \int_0^t \left(\frac{dm_{C.V.}}{dt} \right) dt = (m_2 - m_1)_{C.V.}$$

$$\int_0^t (\sum \dot{m}_e) dt = \sum m_e$$

$$\int_0^t (\sum \dot{m}_i) dt = \sum m_i$$

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum m_e - \sum m_i = 0$$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} + gZ_i \right) = \frac{dE_{c.v.}}{dt} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.}$$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e \right) + \frac{d}{dt} \left[m \left(u + \frac{\mathbf{v}^2}{2} + gZ \right) \right]_{c.v.} + \dot{W}_{c.v.}$$

$$\int_0^t \dot{Q}_{c.v.} dt = Q_{c.v.}$$

$$\int_0^t \dot{W}_{c.v.} dt = W_{c.v.}$$

$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} + gZ_i \right) \right] dt = \sum m_i \left(h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} + gZ_i \right)$$

$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e \right) \right] dt = \sum m_e \left(h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e \right)$$

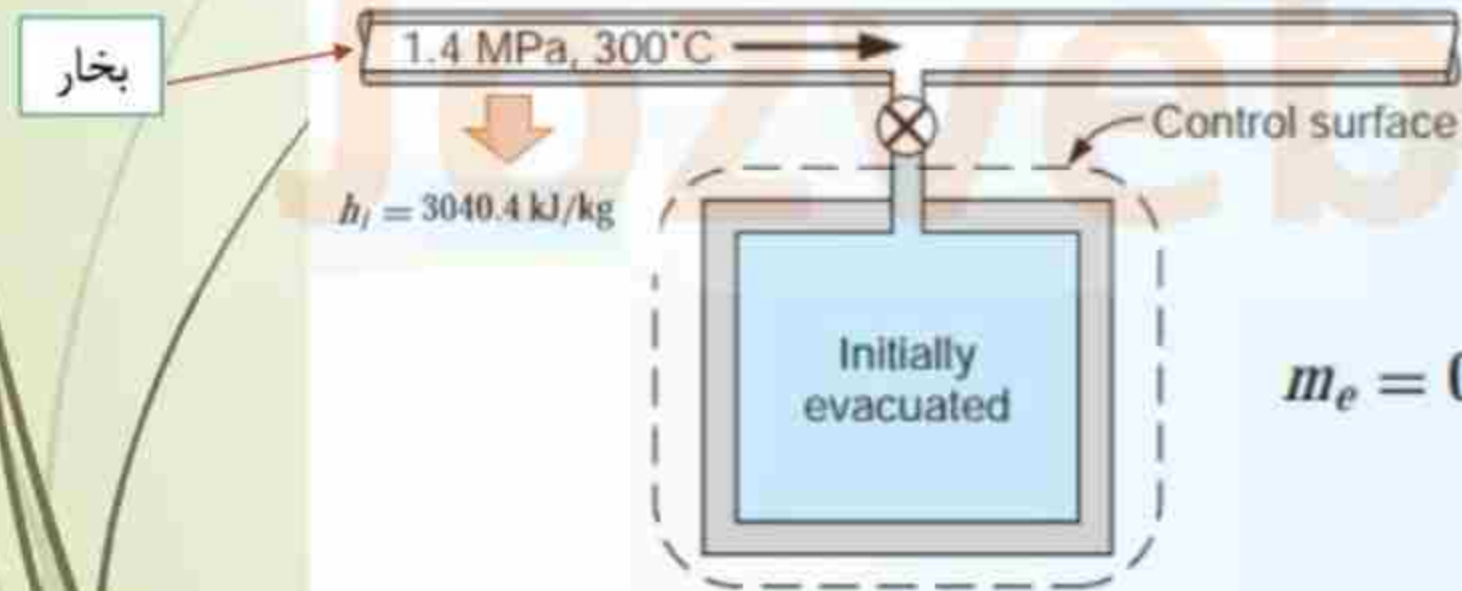
$$\int_0^t \frac{d}{dt} \left[m \left(u + \frac{v^2}{2} + gZ \right) \right]_{c.v.} dt = \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.}$$

معادله حجم کنترل برای حالت گذرا

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.} + W_{c.v.}$$

$$(m_1)_{C.V.} = 0$$

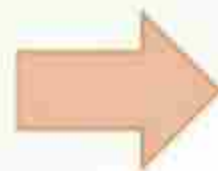
بخار آب در فشار $1/4 \text{ MPa}$ و درجه حرارت 300°C از درون یک لوله مطابق شکل جریان دارد. یک مخزن تهی از طریق یک شیر به این لوله متصل است. شیر تا پرشدن مخزن از بخار آب و رسیدن به فشار $1/4 \text{ MPa}$ باز و بسته می‌شود. فرایند به صورت آدیباتیک صورت می‌گیرد و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل نیز قابل چشم پوشی است. درجه حرارت نهایی بخار آب را تعیین کنید. T_2



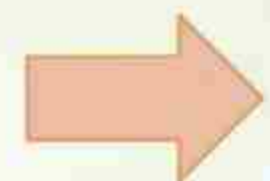
$$Q_{C.V.} = 0, \quad W_{C.V.} = 0,$$

- Control volume:* Tank, as shown in Fig. 6.14.
Initial state (in tank): Evacuated, mass $m_1 = 0$.
Final state: P_2 known.
Inlet state: P_1, T_1 (in line) known.
Process: Transient.
Model: Steam tables.

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.} + W_{c.v.}$$

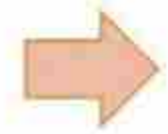


$$m_1 h_i = m_2 u_2$$



$$h_i = u_2$$

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum m_e - \sum m_i = 0$$



$$m_2 = m_1$$

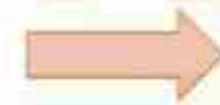
$$h_i = u_2 = 3040.4 \text{ kJ/kg}$$

جدول اشباع $P_2 = 1.4 \text{ MPa}$

$$u_f = h_f - p v_f = 830.29 - 1400 * 0.001149 = 823.6814 \text{ kJ/kg}$$

$$u_g = h_g - p v_g = 2790.00 - 1400 * 0.14084 = 2592.824 \text{ kJ/kg}$$

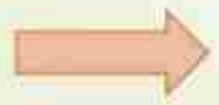
$$u_2 = 3040.4 \text{ kJ/kg}$$



$$u_2 > u_g$$

سوپرهیت

جدول سوپرهیت



$$P_2 = 1.4 \text{ MPa}$$

$$u_2 = 3040.4 \text{ kJ/kg}$$

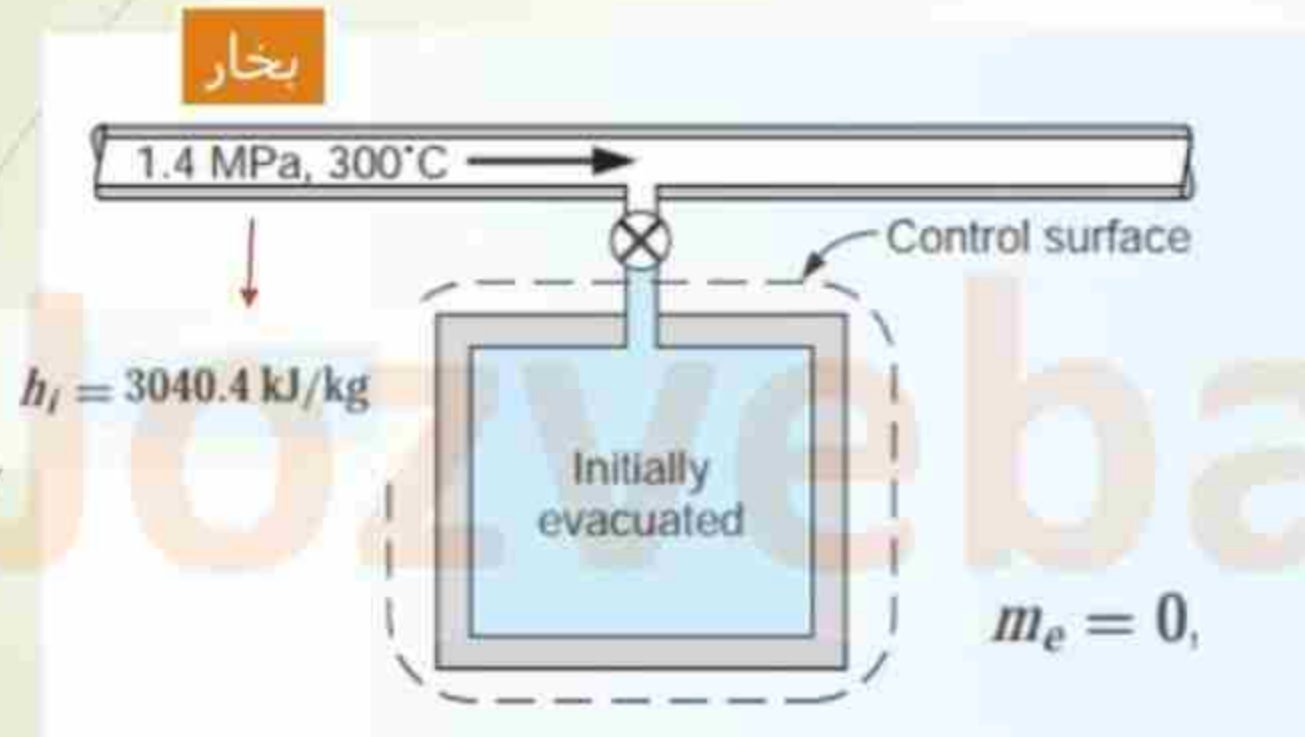


$T = 400, T = 500$
میان یابی

$$T = 452.1 \text{ C}$$

مثال

اگر در تانک مثال قبل، تانک حجم آن 0.4 مترمکعب باشد و در ابتدا شامل بخار اشباع با فشار 350 کیلوپاسکال باشد، شیر باز می شود و بخار به درون تانک می رود و وقتی فشار به $1/4$ مگا پاسکال رسید شیر را می بندیم. دمای نهایی تانک چقدر است؟



- Control volume:* Tank, as in Fig. 6.14.
- Initial state:* P_1 , saturated vapor; state fixed.
- Final state:* P_2 .
- Inlet state:* P_i, T_i ; state fixed.
- Process:* Transient.
- Model:* Steam tables.

T_2

بخار اشباع

$$P_1 = 350 \text{ MPa}$$

$$v_1 = v_g = 0.5243 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 = u_g = 2548.9 \text{ kJ/kg}$$

$$m_1 = \frac{0.4}{0.5243} = 0.763 \text{ kg}$$

$$Q_{C.V.} = 0, \Rightarrow W_{C.V.} = 0$$

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.} + W_{c.v.}$$



$$m_i h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$(m_2 - m_1) h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$m_2 (h_i - u_2) = m_1 (h_i - u_1)$$

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum m_e - \sum m_i = 0$$

$$m_2 - m_1 = m_i$$

$$m_2 (h_i - u_2) = m_1 (h_i - u_1)$$

$$V = 0.4 \text{ m}^3 \quad m_1 = 0.763$$

$$P_2 = 1.4 \text{ MPa}$$

$$m_2 v_2 = V = 0.4 \text{ m}^3$$

$$\frac{V}{v_2} (h_i - u_2) - m_1 (h_i - u_1) = 0$$



$$v_2, u_2 ?$$

$$h_i = 3040.4 \text{ kJ/kg.}$$

$$u_1 = 2548.9 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = 1.4 \text{ MPa}$$

فرض

$$T_2 = 300^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0.1823 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad u_2 = 2785.2 \text{ kJ/kg}$$

*

$$\frac{0.4}{0.1823} (3040.4 - 2785.2) - 0.763(3040.4 - 2548.9) = +185.0 \text{ kJ}$$

$$P_2 = 1.4 \text{ MPa}$$

$$T_2 = 350^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0.2003 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad u_2 = 2869.1 \text{ kJ/kg}$$

*

$$\frac{0.4}{0.2003} (3040.4 - 2869.1) - 0.763(3040.4 - 2548.9) = -32.9 \text{ kJ}$$

$$P_2 = 1.4 \text{ MPa}$$

$$T_2 = 342^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0.1974 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_2 = \frac{0.4}{0.1974} = 2.026 \text{ kg}$$

$$m_1 = m_2 - m_1 = 2.026 - 0.763 = 1.263 \text{ kg}$$

حل تمرین تحویلی:

یک مخزن دو مترمکعبی حاوی آمونیاک اشباع در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد است، در ابتدا مخزن حاوی ۵۰ درصد مایع و ۵۰ درصد بخار حجمی است. توسط شیری که به این مخزن متصل است، از این شیر آنقدر بخار خارج میشود تا دمای آن به ۱۰ درجه سانتیگراد برسد. با فرض اینکه تنها بخار (یعنی بدون مایع) خارج شود و همچنین این فرآیند آدیاباتیک باشد، جرم آمونیاک خارج شده چه مقدار است؟

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum m_e - \sum m_i = 0$$

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + m_e = 0 \quad \star$$

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.} + W_{c.v.}$$

$$m_e h_e + m_2 u_2 - m_1 u_1 = 0 \quad \star$$

$$m_2 (h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1$$

$$h_e = (h_g(40 \text{ C}) + h_g(10 \text{ C})) / 2 = 1470.2 + 1475 = 1461.1 \text{ KJ/Kg}$$

$$v_{f1} = 0.001725 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_{g1} = 0.08313 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{f2} = 0.00160, \quad v_{fg2} = 0.20381$$

$$u_{f1} = 368.7 \text{ kJ/kg}, \quad u_{g1} = 1341.0 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{f2} = 226.0, \quad u_{fg2} = 1099.7$$

$$m_{f1} = \frac{V_f}{v_{f1}} = \frac{1.0}{0.001725} = 579.7 \text{ kg}$$

$$m_1 = m_{f1} + m_{g1} = 579.7 + 12.0 = 591.7 \text{ kg}$$

$$m_{g1} = \frac{V_g}{v_{g1}} = \frac{1.0}{0.08313} = 12.0 \text{ kg}$$

$$m_1 h_e = 591.7 \times 1461.1 = 864533 \text{ kJ}$$

$$m_1 u_1 = (mu)_{f1} + (mu)_{g1} = 579.7 \times 368.7 + 12.0 \times 1341.0 = 229827 \text{ kJ}$$

$$m_2(h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1$$

$$m_2(h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1 = 864533 - 229827 = 634706 \text{ kJ}$$

اشباع
40c

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{2.0}{0.00160 + x_2(0.20381)}$$

vf

vfg

$$u_2 = 226.0 + x_2(1099.7)$$

uf

ufg

$$\frac{2.0(1461.1 - 226.0 - 1099.7x_2)}{0.00160 + 0.20381x_2} = 634706$$

$$x_2 = 0.011057$$

$$m_2(h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1$$

$$v_2 = 0.00160 + 0.011057 \times 0.20381 = 0.0038535 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{2}{0.0038535} = 519 \text{ kg}$$

$$m_e = m_1 - m_2 = 591.7 - 519 = 72.7 \text{ kg}$$

جرم بخار خارج شده

Chapter 6

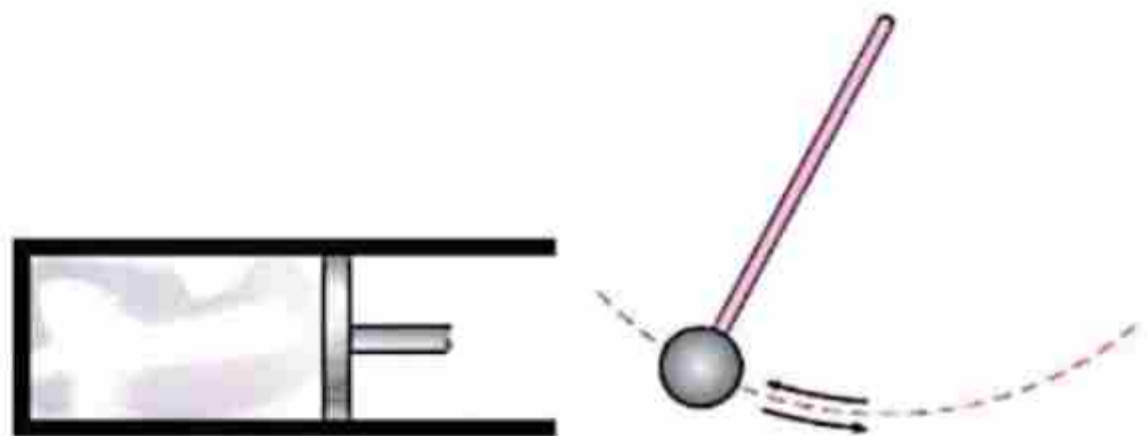
THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

فرآیندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر

قانون دوم ترمودینامیک می گوید هیچ ماشین گرمایی نمی تواند دارای بازده ۱۰۰ درصد باشد. بنابراین سوال می کنیم، بیشترین بازدهی که یک ماشین گرمایی می تواند داشته باشد چقدر است؟ قبل از این که پاسخ این پرسش را بدهیم، ابتدا باید یک فرآینده ایده آلی را، به نام فرآیند برگشت پذیر، تعریف کنیم.

فرآیندهایی که در قسمت ۵-۱ مورد بحث قرار گرفتند در جهت معینی روی می دهند. این فرآیندها پس از وقوع نمی توانند خود به خود در جهت معکوس روی دهند و سیستم را به حالت اول برگردانند. به این دلیل، آنها را فرآیندهای برگشت ناپذیر می گویند. وقتی فنجان قهوه سرد می شود، نمی تواند گرمایی را که به اطراف داده است دوباره به دست آورد. اگر می توانست، اطراف و سیستم (قهوه) به حالت اولیه خود برمی گشتند، و این یک فرآیند برگشت پذیر بود.

فرآیند برگشت پذیر فرآیندی است که بدون بر جای گذاشتن هیچ اثری روی اطراف می تواند معکوس شود. یعنی، سیستم و اطراف، هر دو، در انتهای فرآیند برگشت پذیر به حالت های اولیه خود برمی گردند. این فقط وقتی امکان دارد که گرمای خالص و کار خالص مبادله شده بین سیستم و اطراف برای فرآیند ترکیبی (فرآیند اولیه و معکوس آن) صفر باشد. فرآیندهایی را که برگشت پذیر نیستند فرآیندهای برگشت ناپذیر می گویند.



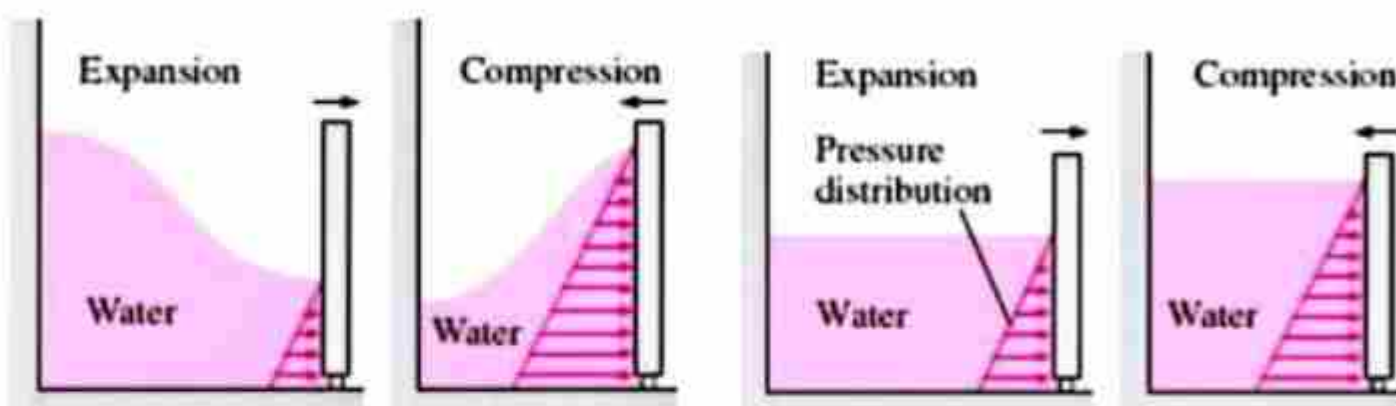
توجه کنید که یک سیستم را با پیوری از فرآیند، بدون توجه به این که فرآیند برگشت پذیر است یا برگشت ناپذیر، می توان به حالت اولیه برگرداند. اما برای فرآیندهای برگشت پذیر، این بازگردانی به حالت اولیه بدون بر جای گذاردن هیچ انرژی روی اطراف انجام می شود، در حالی که در فرآیند برگشت ناپذیر، اطراف معمولاً مقداری کار روی سیستم انجام می دهد و بنابراین به حالت اولیه خود بر نمی گردد.

فرآیند برگشت پذیر واقعاً در طبیعت روی نمی دهند آنها صرفاً ایده آل سازی های فرآیندهای واقعی اند. فرآیندهای برگشت پذیر را می توان به طور تقریبی، نه به طور دقیق، به دست آورد. یعنی تمام فرآیندهایی که در طبیعت روی می دهند برگشت ناپذیرند. بنابراین، شاید تعجب کنید که چرا خودمان را با اینفرآیندهای خیالی رنج می دهیم. دو دلیل وجود دارد. اول اینکه تحلیل آنها

ساده است، زیرا سیستم در فرآیند برگشت پذیر از مجموعه حالت های تعادلی می گذرد؛ دوم، آنها به عنوان مدل های ایده آلی اند که فرآیندهای واقعی را می توان با آنها مقایسه کرد.

مهندسان به فرآیندهای برگشت پذیر علاقه مندند زیرا وسایل مولد کار مانند اتومبیل و توربین های گازی یا بخاری وقتی از فرآیندهای برگشت پذیر استفاده می کنند بیشترین کار را می دهند و وسایل مصرف کننده کار مانند کمپرسورها، فن ها، پمپ ها وقتی از فرآیندهای برگشت پذیر استفاده می کنند کمترین کار را نیاز دارند.

فرآیندهای برگشت پذیر را به عنوان حدود نظری فرآیندهای برگشت ناپذیر متناظر می توان دانست. بعضی از فرآیندها از بعضی دیگر برگشت ناپذیرترند. هرگز نمی توانیم فرآیند برگشت پذیر داشته باشیم، اما می توانیمک به آن نزدیک شویم. هر چه فرآیند به برگشت پذیر بودن نزدیکتر باشد، کار تولید شده توسط وسیله مولد کار بیشتر است، یا کار مورد نیاز وسیله مصرف کننده کار کمتر است.



برگشت ناپذیری ها

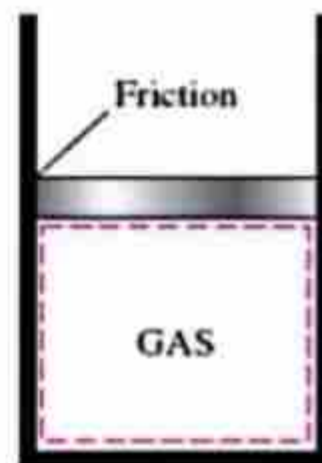
عواملی را که باعث می شوند فرآیندی برگشت ناپذیر باشد برگشت ناپذیری گویند. این عوامل شامل اصطکاک، انبساط نامعقد، اختلاط دو گاز، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، مقاومت الکتریکی، تغییر شکل غیر الاستیک جامدات، و واکنش های شیمیایی هستند. وجود هر یک از این عوامل باعث می شود فرآیند برگشت ناپذیر باشد. هیچ یک از عوامل بالا در فرآیند برگشت پذیر وجود ندارد. بعضی از برگشت ناپذیری هایی که اغلب با آنها روبرو می شویم در زیر توضیح داده شده اند.

اصطکاک

اصطکاک از عوامل شناخته شده برگشت ناپذیری است که به اجسام متحرک مربوط می شود. وقتی می خواهیم دو جسم را که با هم تماس دارند نسبت به یکدیگر به حرکت در آوریم، نیروی اصطکاک در سطح مشترک این دو جسم با این حرکت مخالف می کند، و بر غلبه بر این نیروی اصطکاک مقدار کار لازم است. کار انجام شده در فرآیند به گرما تبدیل می شود و به اجسامی که با هم تماس دارند داده می شود، و دما در سطح مشترک دو جسم افزایش می یابد. وقتی جهت حرکت معکوس شود، اجسام به حرکت اولیه بر می گردند، اما سطح مشترک خنک نمی شود، و گرما تبدیل به کار نمی شود. بلکه، کار بیشتری، ضمن غلبه بر نیروهای اصطکاکی که با حرکت معکوس نیز مخالفت می کنند. به گرما تبدیل می شود. چون سیستم (اجسام متحرک) و اطراف نمی توانند به حالت اولیه خود برگردند، این فرآیند برگشت ناپذیر است. بنابراین، هر فرآیندی که با اصطکاک س و کار دارد برگشت ناپذیر است، و هر چه نیروی اصطکاک موجود بیشتر باشد، فرآیند برگشت ناپذیرتر است.

اصطکاک فقط به اجسام جامدی که با هم تماس دارند محدود نمی شود. اصطکاک بین سیال و جامد، و حتی بین لایه های سیالی که با سرعت های متفاوت حرکت می کنند وجود دارد. کسر قابل توجهی از قدرت تولید شده توسط موتور یک اتومبیل

صرف غلبه بر اصطکاک (نیروی دراگ) بین هوا و سطوح خارجی اتومبیل می‌شود، و به صورت قسمتی از انرژی داخلی هوا در می‌آید. این فرآیند را نمی‌توان معکوس کرد و قدرت هدر رفته را بازیافت، اگر چه انجام چنین کاری اصل پایداری انرژی را نقض نمی‌کند.

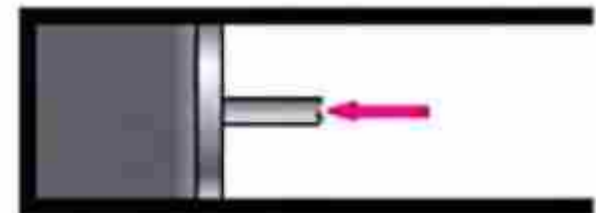


انبساط و تراکم غیر شبه تعادلی

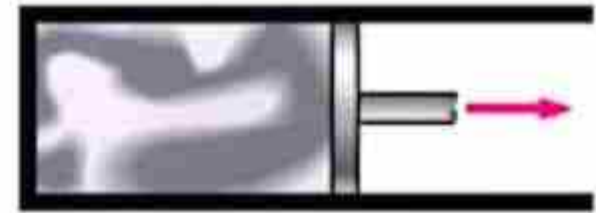
در فصل ۱، فرآیند شبه تعادلی را به عنوان فرآیندی تعریف کردیم که سیستم در طی آن همیشه به طور بی‌نهایت کوچک نزدیک حالت تعادلی است. وسیله سیلندر - پیستونی آدیاباتیک بی اصطکاک را در نظر بگیرید. این وسیله حاوی مقداری گاز است. اکنون پیستون را به داخل سیلندر رانده، و گاز را متراکم می‌کنیم. اگر سرعت پیستون خیلی زیاد نباشد، فشار و دما به طور بکثرت در سرتاسر گاز افزایش می‌یابد. چون سیستم همیشه نزدیک به حالت تعادلی است، این یک فرآیند شبه تعادلی است.

اکنون نیروی خارجی موثر بر پیستون را کمی کاهش می‌دهیم و گاز را کمی منبسط می‌کنیم. اگر گاز به طور آهسته منبسط شود، فرآیند انبساط نیز شبه تعادلی است. وقتی پیستون به حالت اولیه‌اش بر می‌گردد، تمام کار مرزی ($p dv$) انجام شده روی گاز در تراکم در فرآیند انبساط به اطراف داده می‌شود. یعنی، کار خالص در این فرآیند ترکیبی صفر است. همچنین، در این فرآیند انتقال گرما وجود ندارد، و سیستم و اطراف در انتهای فرآیند معکوس به حالت اولی خود بر می‌گردند. بنابراین، انبساط یا تراکم بی اصطکاک آدیاباتیک آهسته گازها یک فرآیند برگشت‌پذیر است.

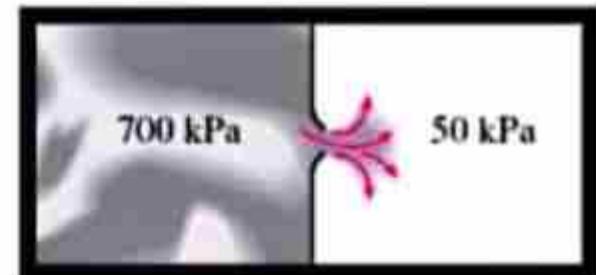
اکنون این فرآیند آدیاباتیک را با روش غیر شبه تعادلی تکرار می‌کنیم. اگر پیستون را خیلی سریع به داخل سیلندر برانیم، مولکولهای گاز در نزدیک سطح پیستون فرصت کافی را برای فرار ندارند، و در جلوی پیستون انباشته می‌شوند. این باعث می‌شود فشار در نزدیک سطح پیستون افزایش یافته، و از فشار موجود در بقیه قسمت‌های داخل سیلندر بیشتر باشد. عدم یکنواختی فشار باعث می‌شود این فرآیند برگشت‌ناپذیر باشد. کار مرزی واقعی تابعی از فشار در سطح پیستون است. به علت وجود فشار بالاتر در سطح پیستون، فرآیند تراکم غیر شبه تعادلی در مقایسه با فرآیند تراکم شبه تعادلی، احتیاج به کار بیشتری دارد وقتی فرآیند با انبساط سریع گاز معکوس می‌شود، مولکولهای گاز در سیلندر نمی‌توانند از پیستون پیروی کنند، و یک ناحیه کم فشار در جلوی سطح پیستون به وجود آید. به علت این فشار کم در سطح پیستون، فرآیند غیر شبه تعادلی، در مقایسه با نوع تعادلی، کار کمتری تولید می‌کند. در نتیجه کار انجام شده توسط اطراف روی گاز در فرآیند تراکم است، و از این رو اطراف دارای کمبود کار خالص است. وقتی پیستون به وضعیت اولیه خود بر می‌گردد، گاز دارای انرژی داخلی مازادی است، که با کمبود کار خالص اطراف برابر است.



(a) Fast compression



(b) Fast expansion



(c) Unrestrained expansion

سیستم را با انتقال این انرژی داخلی مازاد (به صورت گرما) به اطراف می‌توان به حالت اولیه‌اش برگرداند. اما تنها راه برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه‌اش، این است که این گرما به طور کامل به کار تبدیل شود، و آن هم توسط یک ماشین گرمایی انجام می‌شود که دارای بازده ۱۰۰٪ باشد. ولی، انجام آن حتی به طور نظری غیر ممکن است، زیرا قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند. چون فقط سیستم، نه سیستم و اطراف، را می‌توان به حالت اولیه برگرداند نتیجه می‌گیریم که فرآیندهای انبساط یا تراکم غیر شبه تعادلی آدیاباتیک بازگشت ناپذیرند.

مثال دیگر برای انبساط غیر شبه تعادلی انبساط نامقید گازی است که توسط غشائی از خلاء جدا شده است. وقتی غشاء پاره می‌شود، گاز تمام تانک را پر می‌کند. تنها راه برای بازگرداندن سیستم به حالت اولیه‌اش این است که آن را تا حجم اولیه متراکم کنیم، و ضمناً گرما را از گاز دفع کنیم تا به دمای اولیه‌اش برسد. با توجه به پایستاری انرژی، به سهولت می‌توان نشان داد که مقدار گرمای دفع شده از گاز برابر است با مقدار کاری که توسط اطراف روی گاز انجام می‌شود. برای بازگرداندن اطراف به حالت اولیه، باید این گرما را به طور کامل به کار تبدیل کنیم و، در نتیجه، قانون دوم نقض می‌شود. بنابراین، انبساط نامقید گازها یک فرایند برگشت‌ناپذیر است.

انتقال گرما

شکل دیگر از برگشت‌ناپذیری که برای همه ما آشناست انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین است. یک قوطی لیموناد سرد را که در اتاق گرمی قرار دارد در نظر بگیرید. گرما از هوای گرم اتاق به لیموناد سرد منتقل می‌شود. با استفاده از یخچال می‌توان این فرآیند را معکوس کرد و لیموناد را به دمای اولیه برگرداند، که آن هم نیازمند مقداری کار است. درانتهای فرآیند معکوس، لیموناد به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد، اما اطراف برنمی‌گردد. انرژی داخلی اطراف به اندازه کاری که به یخچال داده شده است افزایش می‌یابد.

بازگردانی اطراف به حالت اولیه را فقط با تبدیل کامل این انرژی داخلی مازاد به کار می‌توان انجام داد، که غیرممکن است زیرا قانون دوم را نقض می‌کند. از آنجا که فقط سیستم، نه سیستم و اطراف، را می‌توان به حالت اولیه برگرداند، انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است.

انتقال گرما فقط وقتی می‌تواند روی دهد که اختلاف دمای معینی بین سیستم و اطرافش وجود داشته باشد. بنابراین، از نظر فیزیکی نمی‌توان فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر داشت. اما وقتی اختلاف دمای بین دو جسم به صفر نزدیک می‌شود، انتقال گرما کمتر می‌شود. بنابراین انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای دیفرانسیلی dT را می‌توان برگشت‌پذیر دانست. وقتی dT صفر نزدیک می‌شود، جهت فرآیند را، بدون تبرید، می‌توان معکوس کرد (حداقل به طور نظری). توجه کنید که انتقال گرمای برگشت‌پذیر یک فرآیند خیالی است و در عمل نمی‌توان به آن رسید.

هر چه اختلاف دمای بین دو جسم کمتر باشد؛ آهنگ انتقال گرمای نیز کمتر است. هر گونه انتقال گرمای زیاد بر اثر اختلاف دمای کوچک نیازمند یک سطح بسیار بزرگ و مدت زمان بسیار طولانی است. بنابراین، اگر چه نزدیک شدن به انتقال گرمای برگشت‌پذیر از نقطه نظر ترمودینامیکی مطلوب است، عملاً غیر ممکن است و از نظر اقتصادی نشدنی است.

فرآیندهای برگشت‌پذیر داخلی و برگشت‌پذیر خارجی

فرآیند عبارت است از هر کنش بین سیستم و اطرافش و فرآیند برگشت‌پذیر شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری منسوب به سیستم با اطرافش نمی‌باشد.

فرآیند را برگشت‌پذیر داخلی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در داخل مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. در فرآیند برگشت‌پذیر داخلی، سیستم از یک مجموعه حالت‌های تعادلی می‌گذرد، و وقتی فرآیند معکوس می‌شود، سیستم ضمن بازگشت به حالت اولیه‌اش دقیقاً از همان حالت‌های تعادلی می‌گذرد؛ یعنی، مسیر فرآیندهای رو به جلو و رو به عقب بر هم منطبق‌اند. فرآیند شبه تعادلی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت نمونه‌ای از فرآیند برگشت‌پذیر داخلی است.

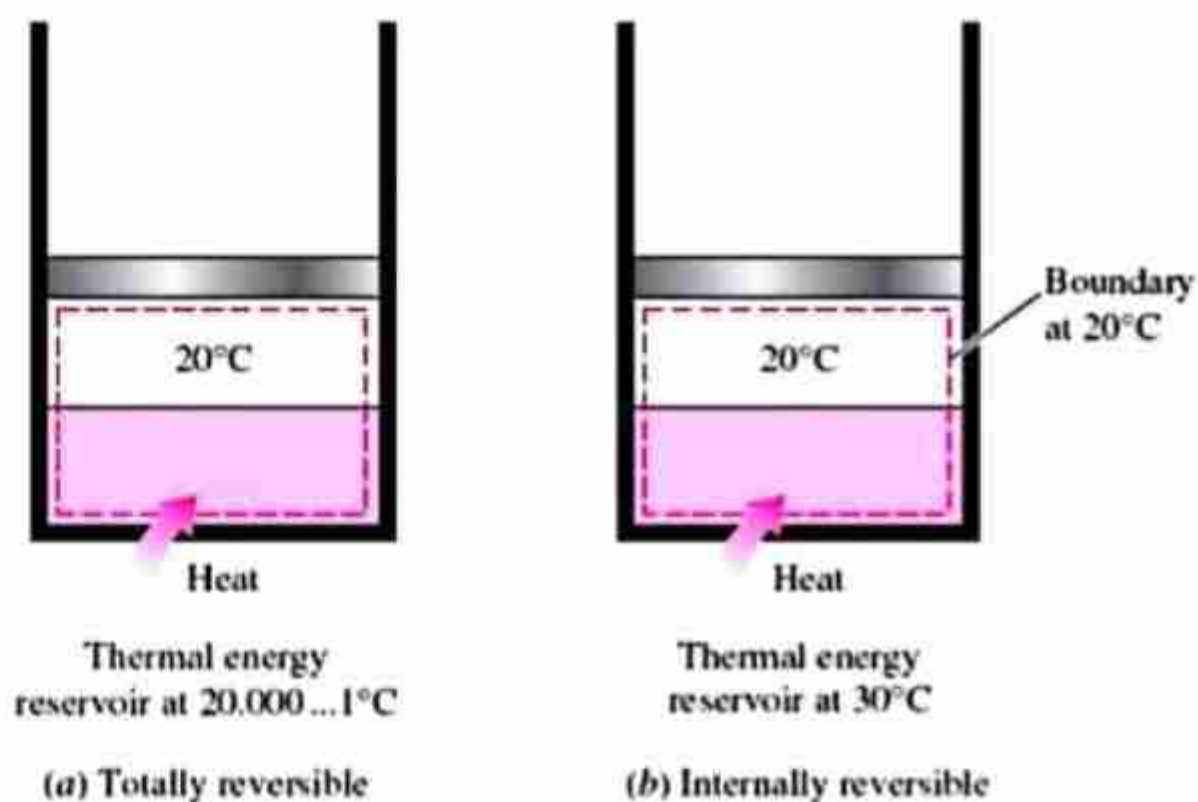
فرآیند را برگشت‌پذیر خارجی می‌گویند هرگاه در طی آن هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در خارج مرزهای سیستم وجود نداشته باشد. انتقال گرما بین یک منبع و یک سیستم یک فرآیند برگشت‌پذیر خارجی خواهد بود هرگاه سطح تماس بین سیستم و منبع در دمای منبع باشد.

فرآیند را بازگشت‌پذیر کلی، یا فقط بازگشت‌پذیر، می‌گویند هرگاه شامل هیچ گونه برگشت‌ناپذیری در سیستم یا در اطرافش نباشد. فرآیند برگشت‌پذیر کلی شامل هیچ گونه انتقال گرمای ناشی از اختلاف دمای معین، شامل هیچ گونه تغییرات غیر شبه تعادلی، و شامل هیچ گونه اصطکاک یا اثرات اتلافی دیگر نیست.

No
irreversibilities
outside
the system



به عنوان مثال انتقال گرما برای دو سیستم همسان را که شامل فرآیند تغییر فاز با فشار ثابت (و از این رو با دمای ثابت) هستند در نظر بگیرید. هر دو فرآیند برگشت پذیر داخلی اند، زیرا هر دو تک دما هستند و هر دو دقیقاً از حالت های تعادلی یکسان می گذرند. فرآیند اول برگشت پذیر خارجی نیز می باشد، زیرا انتقال گرما در این فرآیند بر اثر اختلاف دمای بی نهایت کوچک dT روی می دهد. ولی، فرآیند دوم برگشت ناپذیر خارجی است، زیرا شامل انتقال گرما بر اثر اختلاف دمای معین ΔT است.



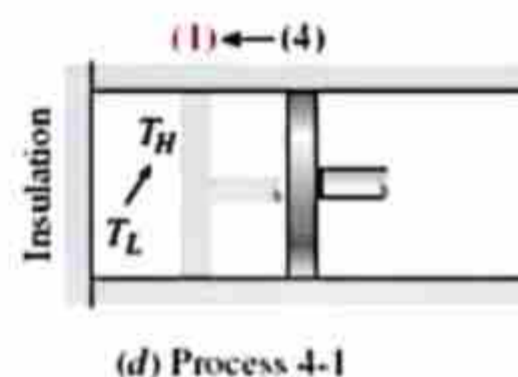
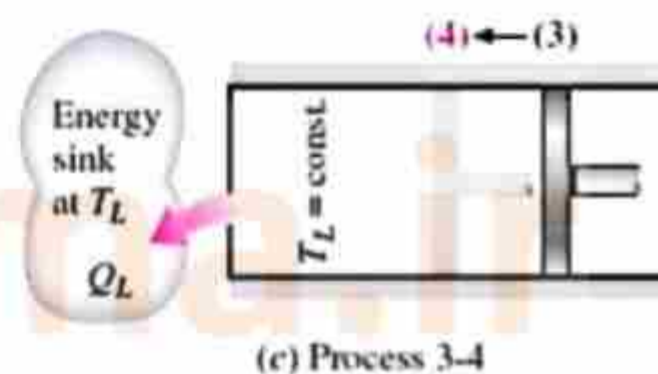
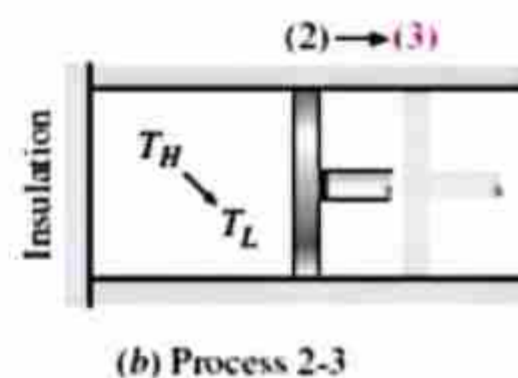
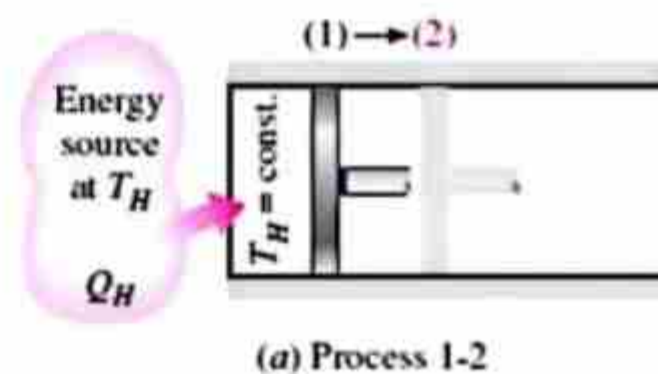
سیکل کارنو

قبلاً گفتیم که ماشین های گرمایی وسایل سیکلی اند و گفتیم که سیال عامل ماشین گرمایی در انتهای هر سیکل به حالت اولیه اش باز می گردد. سیال عامل در قسمتی از سیکل کار انجام می دهد و در قسمت دیگر سیکل روی آن کار انجام می شود. اختلاف بین این دو، کار خالصی است که ماشین گرمایی می دهد. بازده سیکل هر ماشین گرمایی شدیداً به نحوه انجام فرآیندهای تشکیل دهنده سیکل بستگی دارد. کارخالص، و بازده سیکل، را با استفاده از فرآیندهایی که نیاز به حداقل کار دارند و حداکثر کار را تحویل می دهند، یعنی، با استفاده از فرآیندهای برگشت پذیر، می توان به حداکثر رساند. بنابراین، تعجب ندارد که سیکل های برگشت پذیر، یعنی سیکل هایی که تماماً از فرآیندها برگشت پذیر تشکیل شده اند، کارآمدترین سیکل ها هستند.

سیکل های برگشت پذیر را در عمل نمی توان به دست آورد زیرا برگشت ناپذیری ها را در یک فرآیند نمی توان حذف کرد. ولی، عملکرد سیکل های برگشت پذیر بالاترین محدوده عملکرد سیکل های واقعی را تشکیل می دهند. ماشین های گرمایی و یخچال هایی که در سیکل های برگشت پذیر کار می کنند به عنوان مدل هایی هستند که ماشین های گرمایی و یخچال های واقعی را می توان با آنها مقایسه کرد. همچنین، سیکل های برگشت پذیر به عنوان نقاط شروع بررسی سیکل های واقعی به کار می روند، و با تغییرات لازم در آنها، سیکل های واقعی تحلیل می شوند.

سیکل کارنو معروف ترین سیکل برگشت پذیر است، که برای اولین بار توسط مهندس فرانسوی سعدي کارنو در سال 1824 مطرح شد. ماشین گرمایی نظری را که بر مبنای سیکل کارنو کار می کند ماشین گرمایی کارنو می گویند. سیکل کارنو از چهار فرآیند برگشت پذیر تشکیل شده است دو فرآیند تک دما و دو فرآیند آدیاباتیک و آن را در یک سیستم بسته یا در یک سیستم با جریان پایا می توان اجرا کرد.

سیستم بسته متشکل از گاز درون وسیله سیلندر - پیستونی آدیاباتیکی را در نظر بگیرید. عایق‌بندی سر سیلندر طوری است که می‌توان آن را برداشت و، برای انتقال گرما، سیلندر را با منبعی تماس داد. چهار فرآیندی که سیکل کارنو را تشکیل می‌دهند عبارتند از:



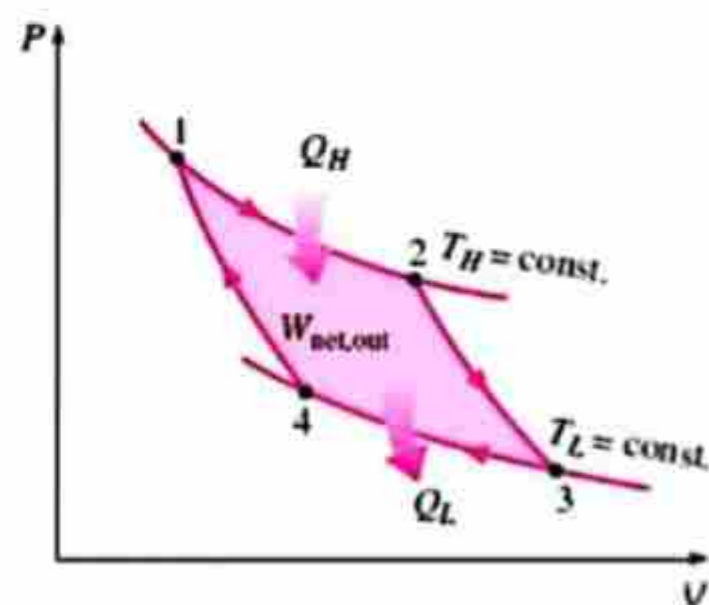
انبساط تک دمای برگشت‌پذیر (فرآیند 1-2، ثابت T_H). در ابتدا (حالت 1)، دمای گاز T_H است و سر سیلندر با یک منبع دما بالا با دمای T_H تماس نزدیک دارد. گاز به طور آهسته منبسط می‌شود، و روی اطراف کار انجام می‌دهد. با انبساط گاز، دمای گاز می‌خواهد کاهش یابد. اما به محض این که دما به اندازه بی‌نهایت کوچک dT افت می‌کند، مقداری گرما از منبع به طرف گاز جریان می‌یابد، و دمای گاز را تا T_H بالا می‌برد. بنابراین دمای گاز در T_H ثابت می‌ماند. چون اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ‌وقت از مقدار دیفرانسیلی dT بیشتر نمی‌شود، این یک فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر است. این فرآیند ادامه می‌یابد تا پیستون به وضعیت 2 می‌رسد. مقدار گرمای کل داده شده به گاز در این فرآیند Q_H است.

انبساط آدیاباتیک برگشت‌پذیر (فرآیند 2-3، کاهش دما از T_H تا T_L). در حالت 2، منبعی که با سر سیلندر تماس داشت برداشته می‌شود و عایق‌بندی جای آن را می‌گیرد و به این ترتیب، سیستم آدیاباتیک می‌شود. گاز به آهستگی به انبساط خود ادامه می‌دهد، روی اطراف کار انجام می‌دهد تا این که دمای آن از T_H تا T_L افت می‌کند (حالت 3). پیستون را بی‌اصطکاک و فرآیند را شبه تعادلی می‌گیریم، بنابراین فرآیند برگشت‌پذیر و آدیاباتیک است.

تراکم تک دمای برگشت‌پذیر (فرآیند 3-4، ثابت T_L). در حالت 3، عایق‌بندی در سر سیلندر برداشته می‌شود، و سیلندر با یک منبع دما پایین با دمای T_L تماس داده می‌شود. اکنون پیستون با نیروی خارجی به طرف داخل رانده می‌شود، و روی گاز کار انجام می‌دهد. با تراکم گاز، دمای آن می‌خواهد افزایش یابد. اما به محض این که دما به مقدار بی‌نهایت کوچک dT بالا می‌رود، گرما از گاز به طرف منبع جریان می‌یابد، و دمای گاز تا T_L افت می‌کند. به این ترتیب، دمای گاز در T_L ثابت می‌ماند. از آنجا که اختلاف دمای بین گاز و منبع هیچ‌وقت از مقدار دیفرانسیلی dT بیشتر نمی‌شود، این یک فرآیند انتقال گرمای برگشت‌پذیر است. این فرآیند ادامه می‌یابد تا پیستون به حالت 4 می‌رسد. مقدار گرمای دفع شده از گاز در این فرآیند Q_L است.

تراکم آدیاباتیک برگشت‌پذیر (فرآیند 4-1، دما از T_L تا T_H افزایش می‌یابد). در حالت 4، منبع دما پایین حذف می‌شود و جای آن را عایق‌بندی می‌گیرد. گاز به طور برگشت‌پذیر متراکم می‌شود، و به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد (حالت 1). دما در این فرآیند تراکم آدیاباتیک برگشت‌پذیر از T_L تا T_H افزایش می‌یابد، و سیکل تکمیل می‌شود.

نمودار $p-v$ این سیکل در شکل 44-5 نشان داده شده است. می‌دانیم که سطح زیر منحنی نمودار $p-v$ کار مرزی را برای فرآیندهای شبه تعادلی (برگشت‌پذیر داخلی) نشان می‌دهد، و در این فرآیند سطح زیر منحنی 1-2-3-4 کار انجام شده توسط گاز در قسمت انبساطی سیکل است، و سطح زیر منحنی 1-4-3-2 کار انجام شده روی گاز در قسمت تراکمی سیکل است. مساحت محصور بین مسیرهای مختلف سیکل (سطح 1-4-3-2-1) اختلاف بین این دو سطح است و کار خالص انجام شده را در سیکل نشان می‌دهد.



توجه کنید اگر، برای صرفه‌جویی Q_L ، گاز را در مرحله 3 به جای تک دما به طور آدیاباتیک متراکم می‌کردیم، سیکل در حالت 2 خاتمه می‌یافت و فرآیند روی مسیر 3-2 برمی‌گشت. با انجام این کار Q_L را صرفه‌جویی می‌کردیم اما نمی‌توانستیم هیچ کار خالص خروجی از این ماشین داشته باشیم. بار دیگر دیده می‌شود که یک ماشین گرمایی برای انجام سیکل و تولید مقداری کار خالص باید حداقل با دو منبع، با دماهای متفاوت، کار کند.

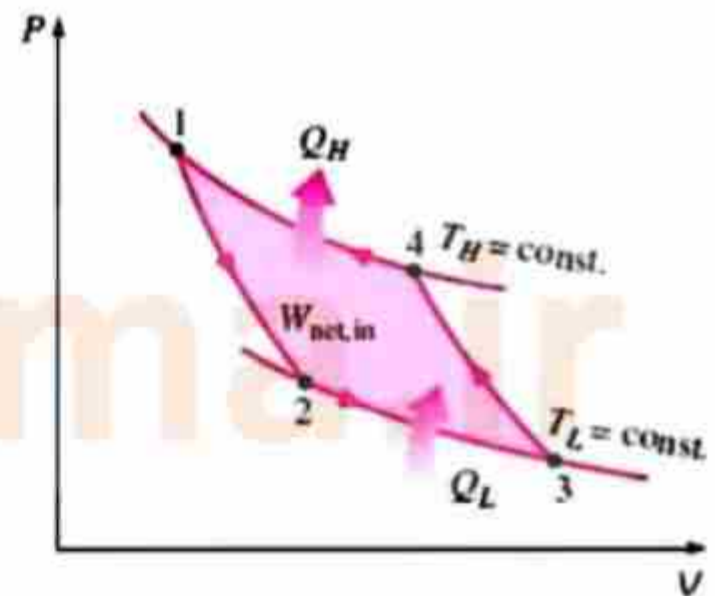
سیکل کارنو را در سیستم‌های با جریان پایا نیز می‌توان اجرا کرد. این موضوع را در فصل 8 در ارتباط با سایر سیکل‌های قدرت بررسی می‌کنیم.

سیکل کارنو، به عنوان یک سیکل برگشت‌پذیر، کارآمدترین سیکلی است که بین دو دمای مشخص کار می‌کند. اگر چه سیکل کارنو را در عمل نمی‌توان به دست آورد، بازده سیکل‌های واقعی را بانزدیک‌تر کردن به سیکل کارنو می‌توان بهبود بخشید.

سیکل کارنوی معکوس

سیکل کارنوی ماشین گرمایی که در بالا توضیح داده شده یک سیکل برگشت‌پذیر است. بنابراین، تمام فرآیندهای آن را می‌توان معکوس کرده، و آن را به سیکل تبرید کارنو تبدیل کرد. این سیکل دقیقاً همان سیکل قبلی است، با این تفاوت که جهت برهم کنش‌های گرما و کار معکوس می‌شوند: گرما با مقدار Q_L از منبع دما پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار Q_H به منبع دما بالا پایین جذب می‌شود، گرما با مقدار Q_H به منبع دما بالا دفع می‌شود، و برای انجام این فرآیندها کار خالص ورودی W مورد نیاز است.

نمودار $P-v$ سیکل کارنوی معکوس مانند نموداری است که برای سیکل کارنو داده شد، به جز این که جهت فرآیندها معکوس می‌شوند.

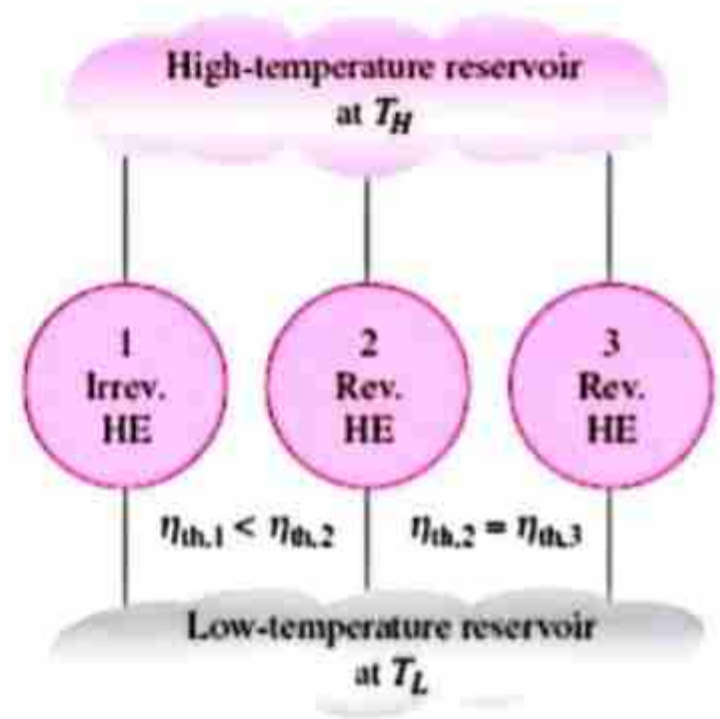


5-9 اصول کارنو

قانون دوم ترمودینامیک برای کارکرد وسایل سیکلی محدودیت‌هایی قائل می‌شود که با بیان‌های کلین-پلانک و کلازیوس توضیح داده شده‌اند. ماشین گرمایی از طریق تبادل گرما با یک منبع تنها نمی‌تواند کار کند، و یخچال نمی‌تواند بدون دریافت کار خالص از منبع خارجی کار کند.

از این عبارات نتایج مهمی می‌گیریم، دو تا از این نتایج مربوط می‌شوند به بازده گرمایی ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر (یعنی، واقعی)، و آنها را اصول کارنو می‌گویند با تعریف‌های زیر:

- 1- بازده ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر همیشه کمتر از بازده ماشین برگشت‌پذیری است که بین همان دو منبع کار می‌کند.
 - 2- بازده‌های تمام ماشین‌های گرمایی برگشت‌پذیر که بین دو منبع یکسان کار می‌کنند با هم برابرند.
- می‌توان نشان داد که نقض هر یک از دو عبارت بالا منجر به نقض قانون دوم ترمودینامیک می‌شود و به این ترتیب صحت آنها اثبات می‌شود.

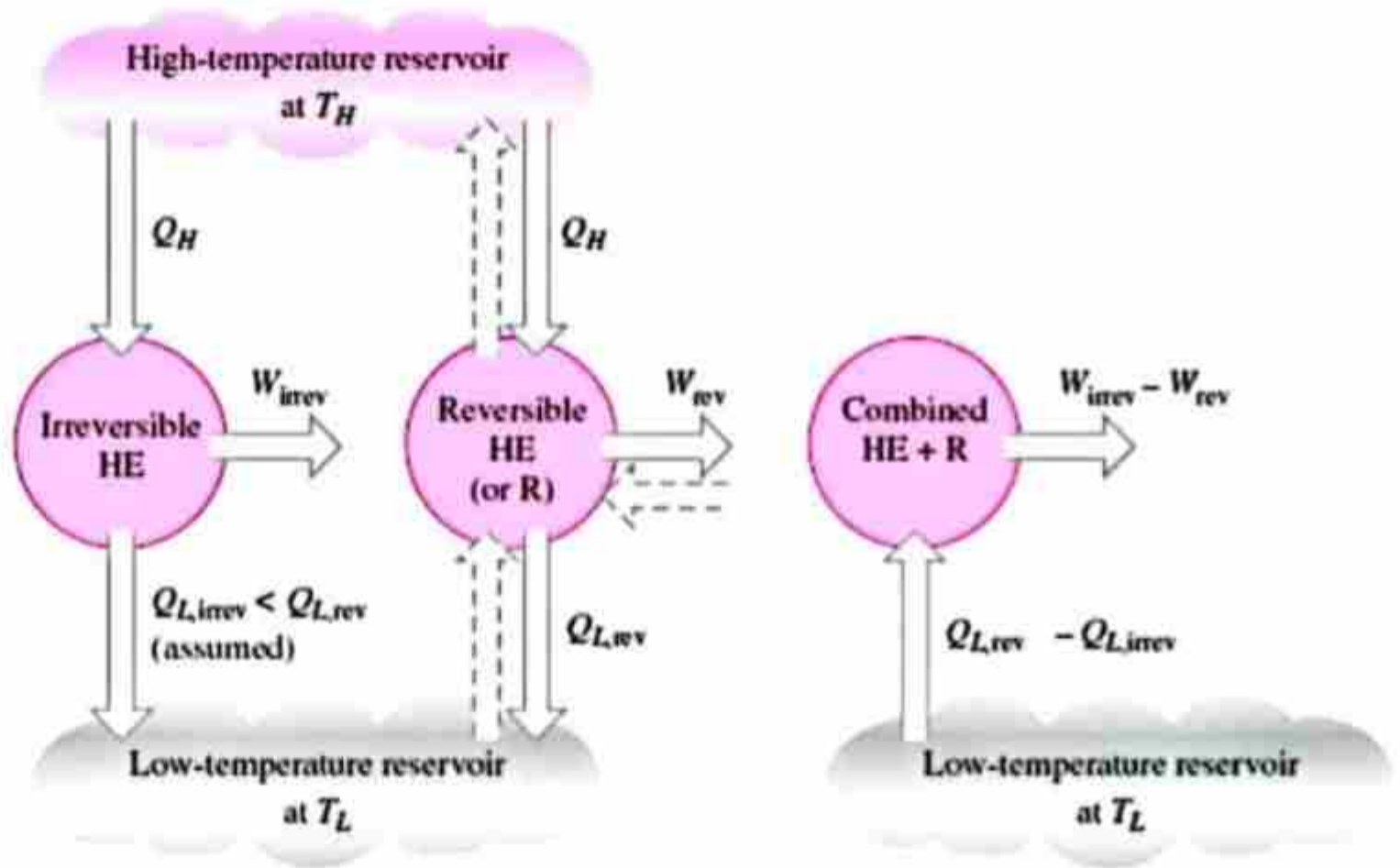


برای اثبات صحت اصل اول کارنو، دو ماشین گرمایی را که بین منابع یکسان کار می‌کنند. در نظر بگیرید. یکی از ماشین‌ها برگشت‌پذیر، و دیگری برگشت‌ناپذیر است. به هر ماشین مقدار گرمای یکسان Q_H می‌دهیم. مقدار کار تولید شده توسط ماشین گرمایی برگشت‌پذیر W_{rev} ، و توسط ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر W_{irrev} است.

برای نقض اصل اول کارنو، فرض می‌کنیم که ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر از ماشین گرمایی برگشت‌پذیر کارآمدتر است (یعنی، $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$) و از این‌رو، در مقایسه با ماشین گرمایی برگشت‌پذیر، کار بیشتری تولید می‌کند و اکنون ماشین گرمایی برگشت‌پذیر را معکوس می‌کنیم تا مانند یخچال کار کند. این یخچال کار W_{rev} را دریافت می‌کند و به منبع دما بالا گرما می‌دهد. چون یخچال مقدار Q_H گرما را به منبع دما بالا می‌دهد و ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر همان مقدار گرما را از این منبع دریافت می‌کند، تبادل خالص گرما برای این منبع صفر است. بنابراین، این تبادل گرما را با داشتن یخچالی که Q_H را مستقیماً به ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر می‌دهد می‌توان حذف کرد.

اکنون با در نظر گرفتن ترکیب یخچال- ماشین برگشت‌ناپذیر ماشینی داریم که کار خالص با مقدار $W_{irrev} - W_{rev}$ را تولید می‌کند و فقط با یک منبع تبادل گرما دارد- نقض بیان کلونین- پلانک. بنابراین، فرض اول، $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$ نادرست است. و نتیجه می‌گیریم هیچ ماشین گرمایی نمی‌تواند کارآمدتر از یک ماشین گرمایی برگشت‌پذیری باشد که بین همان دو منبع کار می‌کند.

اصل دوم کارنو را نیز به طور مشابه می‌توان ثابت کرد. در اینجا، ماشین برگشت‌ناپذیر را با یک ماشین برگشت‌پذیر، که از ماشین برگشت‌پذیر اول کارآمدتر است و کار بیشتری تولید می‌کند، جایگزین می‌کنیم. با دنبال کردن استدلال بالا، نتیجه می‌گیریم ماشینی داریم که مقداری کار تولید می‌کند. در حالی که با یک منبع تنها تبادل گرما دارد، که نقض قانون دوم است. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هیچ ماشین برگشت‌پذیری نمی‌تواند از ماشین برگشت‌پذیر دیگری که بین همان دو منبع کار می‌کند کارآمدتر باشد، و این موضوع به نحوه تکمیل سیکل یا به سیال عامل بستگی ندارد.



(a) A reversible and an irreversible heat engine operating between the same two reservoirs (the reversible heat engine is then reversed to run as a refrigerator)

(b) The equivalent combined system

Jozvebama.ir

ماشین گرمایی کارنو

ماشین گرمایی فرضی را که در سیکل برگشت پذیر کارنو کار می کند ماشین گرمایی کارنو می گویند. بازده گرمایی هر ماشین گرمایی، برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر، با معادله 5-6 داده می شود.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

که در آن Q_H گرمای منتقل شده از منبع دما بالا با دمای T_H به ماشین گرمایی است، و Q_L گرمای دفع شده به منبع دما پایین با دمای T_L است برای ماشین های گرمایی برگشت پذیر، نسبت انتقال گرما در رابطه بالا را با نسبت دماهای مطلق دو منبع می توان جایگزین کرد، (معادله 5-18). بنابراین بازده ماشین کارنو، یا هر ماشین گرمایی برگشت پذیر، به صورت زیر است

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (20-5)$$

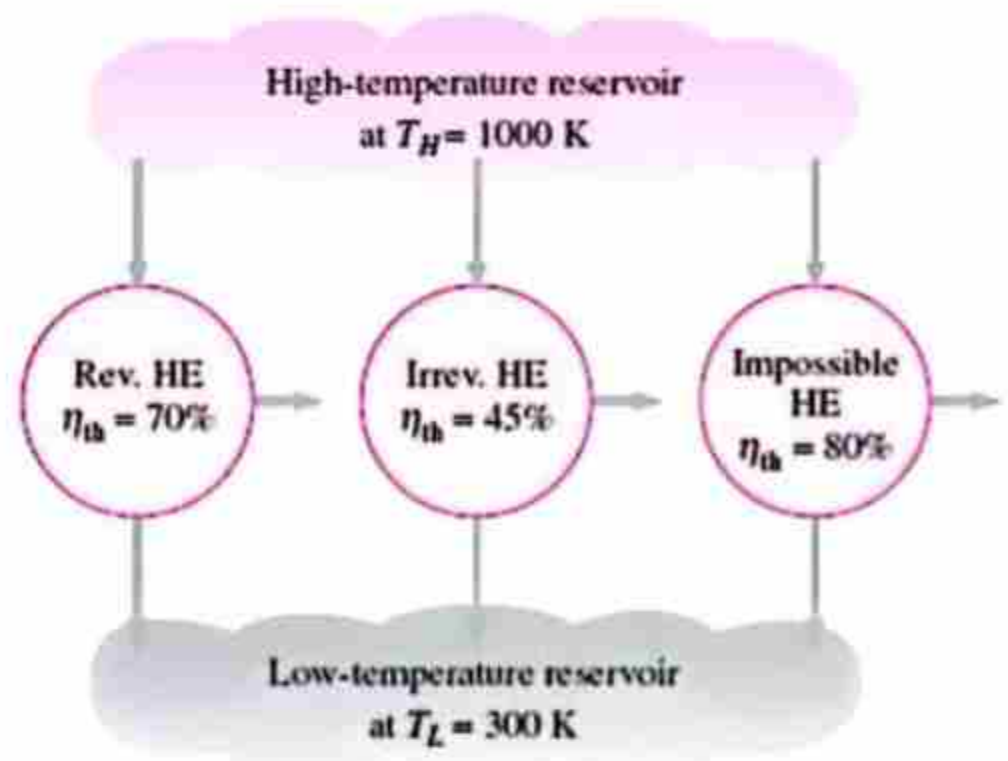
این رابطه را بازده کارنو می گویند، زیرا ماشین گرمایی کارنو معروفترین ماشین برگشت پذیر است. این بیشترین بازدهی است که هر ماشین گرمایی که بین دو منبع گرمایی با دماهای T_H و T_L کار می کند می تواند دارا باشد. تمام ماشین های گرمایی برگشت ناپذیر (یعنی، واقعی) که بین این حدود دما (T_H و T_L) کار می کنند دارای بازده کمتری هستند. بازده ماشین گرمایی واقعی نمی تواند به این ماکزیمم مقدار نظری برسد زیرا نمی توان تمام بازگشت ناپذیری های مربوط به سیکل واقعی را از بین برد.



توجه کنید که T_H و T_L در معادله 5-20 دماهای مطلق اند.

استفاده از $^{\circ}\text{C}$ یا $^{\circ}\text{F}$ برای دما در این معادله نتایج اشتباه می دهد.

بازده گرمایی ماشین های گرمایی واقعی و برگشت پذیر که بین حدود دمایی یکسان کار می کنند به صورت زیر با هم مقایسه می شوند.



(21-5)

- ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر $\eta_{th} < \eta_{th,rev}$
- ماشین گرمایی برگشت‌پذیر $\eta_{th} = \eta_{th,rev}$
- ماشین گرمایی غیر ممکن $\eta_{th} > \eta_{th,rev}$

بیشتر وسایل مولد کار (ماشین‌های گرمایی) دارای بازده کمتر از 40 درصد هستند، که در مقایسه با 100 درصد، مقدار پایینی است. ولی، هنگام ارزیابی عملکرد ماشین‌های گرمایی واقعی، بازده را نباید با 100 درصد مقایسه کنیم؛ بلکه، باید آن را با بازده یک ماشین گرمایی برگشت‌پذیری که بین همان حدود دما کار می‌کند مقایسه کنیم زیرا این بالاترین بازده نظری است، نه 100 درصد.

ماکزیمم بازده نیروگاه بخاری که بین $T_H = 750\text{K}$ و $T_L = 300\text{K}$ کار می‌کند، از معادله 5-20، برابر با 60 درصد است. در مقایسه با این مقدار، بازده واقعی 40 درصد چندان بد نیست، اگر چه هنوز جای افزایش دارد. از معادله 5-20 دیده می‌شود که بازده ماشین گرمایی کارنو با افزایش T_H ، یا با کاهش T_L ، افزایش می‌یابد. انتظار چنین نتیجه‌ای را داریم زیرا با کاهش T_L ، مقدار گرمای دفع شده نیز کاهش می‌یابد، و بازده کارنو به 1 نزدیک می‌شود. این حالت برای ماشین‌های گرمایی واقعی نیز صحت دارد. بازده گرمایی ماشین‌های گرمایی واقعی را با انتقال گرما به ماشین در بالاترین دمای ممکن (که توسط مقاومت مصالح محدود می‌شود) و با دفع گرما در پایین‌ترین دمای ممکن (که توسط محیط خنک کن از قبیل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، یا اتمسفر محدود می‌شود) می‌توان به حداکثر رساند.

یخچال و پمپ گرمای کارنو

یخچال یا پمپ گرمایی را که بر مبنای سیکل کارنوی معکوس کار می‌کند یخچال کارنو، یا پمپ گرمای کارنو می‌گویند. ضریب عملکرد هر یخچال یا پمپ گرما، برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر، با معادلات 5-11 و 5-13 داده می‌شود

$$COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{و} \quad COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

که در آن Q_L مقدار گرمای جذب شده از محیط دما پایین، و Q_H مقدار گرمای دفع شده به محیط دما بالاست. با قرار دادن نسبت دماهای مطلق محیط‌های دما بالا و دما پایین به جای نسبت انتقال گرما در روابط بالا (بر طبق معادله 5-18)، می‌توان ضریب عملکرد تمام یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر (مانند یخچال و پمپ گرمای کارنو) را تعیین کرد. بنابراین روابط COP برای یخچال‌ها و پمپ‌های گرمای برگشت‌پذیر به صورت زیر درمی‌آیند

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (22-5)$$

و

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (23-5)$$

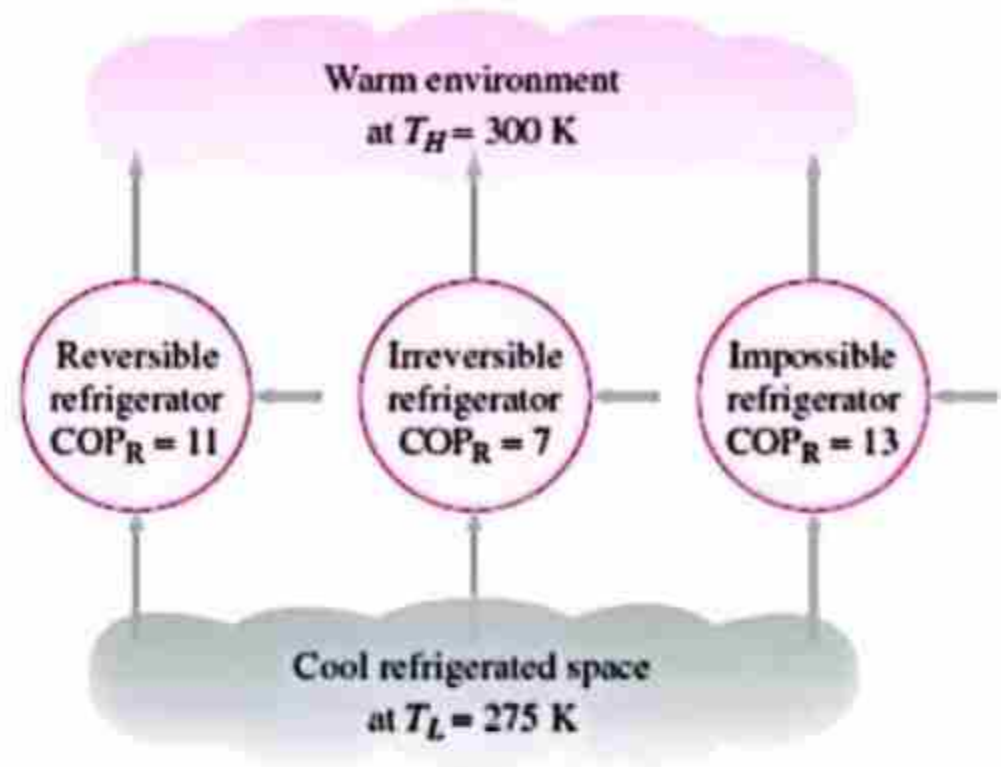
اینها بیشترین ضرایب عملکردی هستند که یخچال یا پمپ گرمایی که بین حدود دمایی T_H, T_L کار می‌کند می‌تواند دارا باشد. تمام یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی که بین این حدود دما (T_H, T_L) کار می‌کنند دارای ضریب عملکرد پایین‌ترند.

ضرایب عملکرد یخچال‌های واقعی و برگشت‌پذیر را که بین حدود دمای یکسان کار می‌کنند به صورت زیر می‌توان با هم مقایسه کرد

$$COP_R \begin{cases} < COP_{R,rev} \\ = COP_{R,rev} \\ > COP_{R,rev} \end{cases}$$

با جایگزین کردن مقادیر COP_R در معادله 5-24 توسط COP_{HP} ، می‌توان رابطه مشابهی را برای پمپ‌های گرما به دست آورد.

COP یخچال یا پمپ گرمای برگشت‌پذیر بیشترین مقدار نظری برای حدود دمای داده شده است. با بهبود طرح یخچال‌ها یا پمپ‌های گرمای واقعی می‌توان ضرایب عملکرد آنها را به این مقدار نظری نزدیک کرد، اما هیچ وقت نمی‌توان به آن رسید. شایان ذکر است که COP یخچال‌ها و پمپ‌های گرما با کاهش T_L کاهش می‌یابد. یعنی، برای جذب گرما از محیط‌های دما پایین، کار بیشتری لازم دارند. وقتی دمای فضای سرد شده به صفر نزدیک می‌شود، مقدار کار لازم برای تولید مقدار معینی تبرید به بی‌نهایت میل می‌کند و COP_R به صفر نزدیک می‌شود.



Jozvebama.ir

(۱) در یک نیروگاه بخار 1MW حرارت در درجه حرارت 700 C به دیگ بخار افزوده می شود. 0.58MW حرارت در 40C از کندانسور خارج می شود و کار مصرفی پمپ 0.02MW است. بازده حرارتی نیروگاه را پیدا کنید. با در نظر گرفتن همان مقدار کار پمپ و انتقال حرارتی که به دیگ بخار داده می شود. اگر تیرگاه در سیکل کارنو کار کند، توربین چه مقدار توان تولید خواهد کرد؟ انرژی که در حالت کارنو از کندانسور خارج می شود چه مقدار است؟

$$\dot{Q}_H = 1 \text{ MW} \quad , \quad T_H = 700^\circ\text{C} = 973.15 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_L = 0.58 \text{ MW} \quad , \quad T_L = 40^\circ\text{C} = 313.15 \text{ K} \quad , \quad \dot{W}_P = 0.02 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{حرارتی}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 0.42$$

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H}$$

اگر نیروگاه در سیکل کارنو کار کند.

$$\Rightarrow \dot{W}_{net} = \dot{Q}_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) = 0.68 \text{ MW} \quad , \quad \dot{W}_t = \dot{W}_{net} + \dot{W}_P = 0.7 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{net} = 0.32 \text{ MW} \quad . \quad \text{[اگر نیروگاه در سیکل کارنو کار کند، داریم]}$$

$$W_{net} = Q_H - Q_L$$

که کمتر از مقدار اولیه $\dot{Q}_L = 0.58 \text{ MW}$ خواهد بود.

۲) موتور اتومبیلی با بازده گرمایی 35 درصد کار می‌کند. فرض کنید دستگاه تهویه مطبوع دارای ضریب عملکردی معادل یک سوم ماکزیمم تئوری بوده و بطور مکانیکی بوسیله موتور به حرکت در می‌آید. چه مقدار سوخت اضافی باید مصرف شود تا 1 kJ حرارت در دمای 15C به محیط در 35C تخلیه شود؟

$$\eta_{th} = 35\% = 0.35, \quad T_H = 35^\circ\text{C} = 308.15\text{K}, \quad T_L = 15^\circ\text{C} = 288.15\text{K}$$

$$\Rightarrow \beta_{theory} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} = 14.41 \Rightarrow \beta_{real} = \frac{1}{3} \beta_{theory} = 4.803$$

$$\beta_{real} = \frac{Q_L}{W_{real}} \Rightarrow W_{real} = \frac{Q_L}{\beta_{real}} = \frac{1}{4.803} = 0.2082 \text{ kJ}$$

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} \Rightarrow Q_H = W/\eta_{th} \Rightarrow Q_H = \frac{0.2082}{0.35} = 0.5949 \text{ kJ}$$