



**MohandesYar.com**

مهندس یار، یار مهندسان ایرانی!

جزوه درس ترمودینامیک

لطفاً نواقص احتمالی این جزوه را جهت اصلاح در ویرایش های بعدی به نشانی  
tahmures@mohandesyar.com ارسال فرمایید.

# مفاهیم و تعاریف ابتدایی

## خاصیت (Property) :

پارامترهای قابل اندازه گیری یک سیستم در یک حالت خاص را خاصیت می گویند. مانند فشار (P)، درجه حرارت (T) و حجم (V). توجه: کار و انرژی خاصیت سیستم **نیستند**.

## خاصیت های گسترده (Extensive):

خاصیت های که **وابسته** به مقدار ماده هستند، مانند حجم و جرم.

## خاصیت های متمرکز (Intensive):

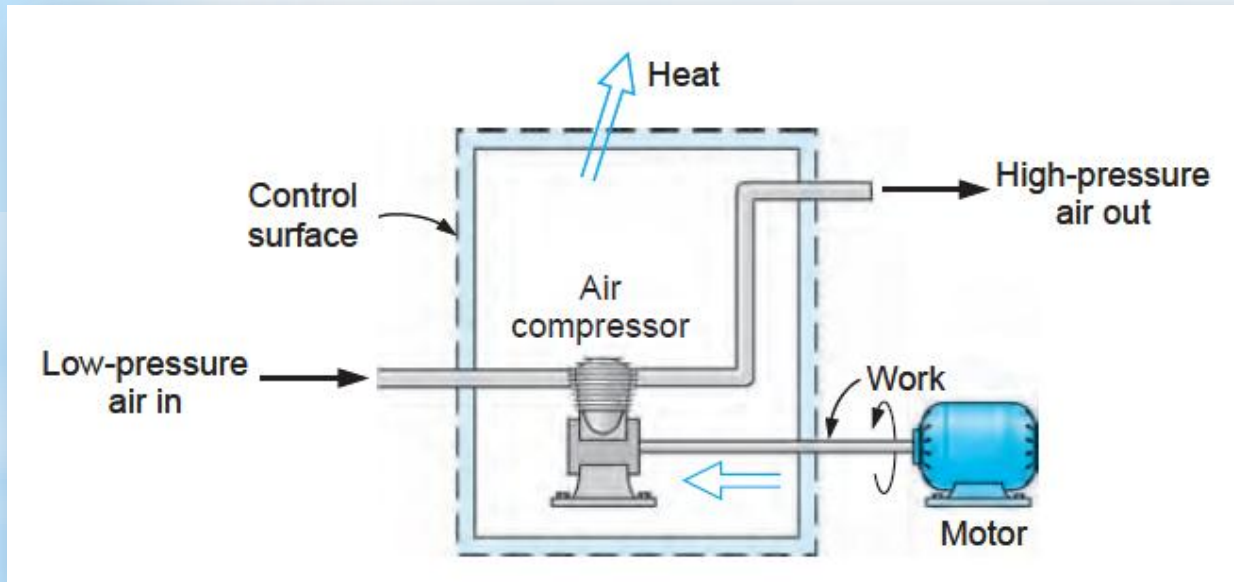
خاصیت های که **مستقل** از مقدار ماده هستند، مانند درجه حرارت و فشار.

## وضعیت ماده (State):

مجموع خواص گسترده و متمرکز یک ماده در یک موقعیت خاص، **وضعیت** ماده گفته می شود.

## مفاهیم و تعاریف ابتدایی

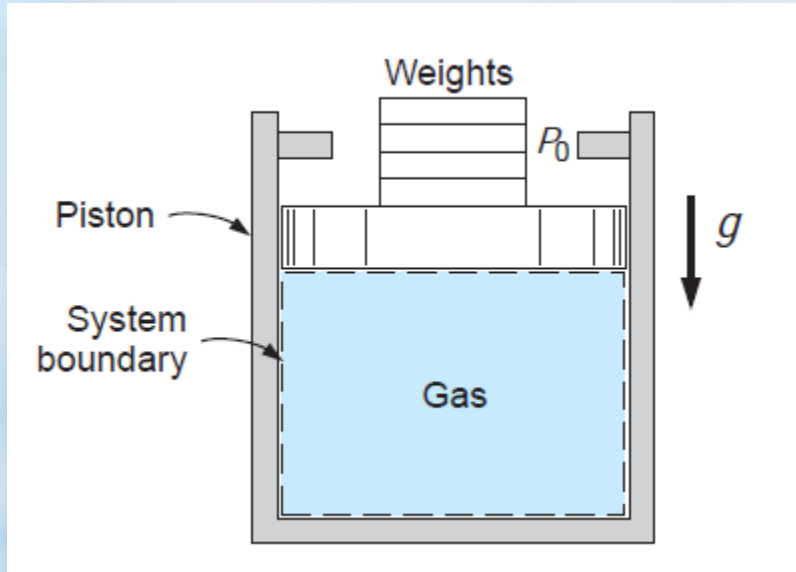
حجم کنترل (Control volume):



قسمتی از فضا که توسط یک مرز مشخص به نام سطح کنترل و یا **Control surface** از محیط اطراف مجزا می شود. حجم کنترل و محیط تبادل گرما، کار و جریان مواد خروجی و ورودی انجام می پذیرد. مرز مورد اشاره می تواند حقیقی و یا مجازی باشد.

## مفاهیم و تعاریف ابتدایی

جرم کنترل (Control mass):

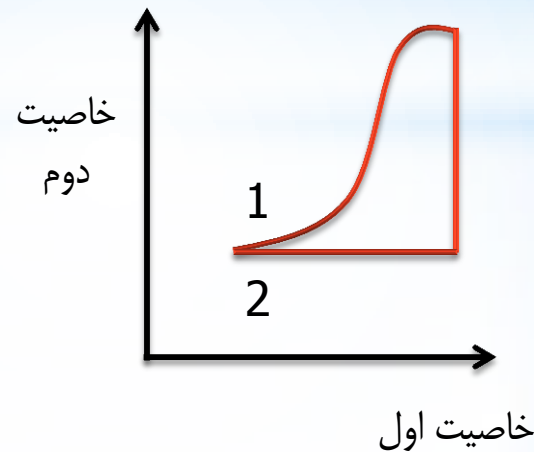
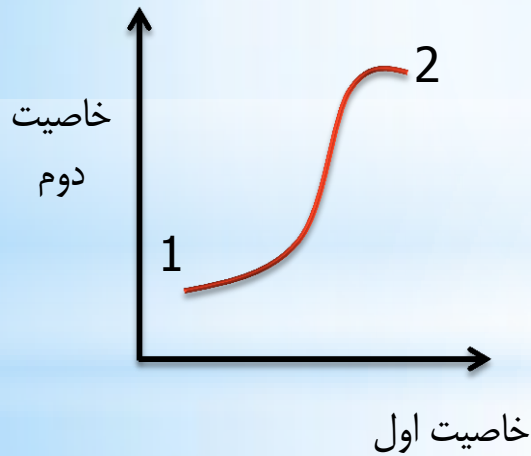


در صورتی که سیستم مورد بررسی هیچ گونه تبادل جرمی با محیط نداشته باشد، به عبارت دیگر در صورتی که جرم مورد نظر ثابت باشد، یک جرم کنترل خواهیم داشت.

# مفاهیم و تعاریف ابتدایی

## فرآیند (Process)

با تغییر یک و یا تعدادی از خواص سیستم، وضعیت آن تغییر خواهد کرد. به مسیر پیموده شده از حالت اول به حالت دوم **فرآیند** گفته می شود.



## چرخه (Cycle)

اگر یک سیستم پس از پیمودن چندین فرآیند به نقطه ابتدایی بازگردد، یک چرخه را پیموده است.

## مفاهیم و تعاریف ابتدایی

حجم مخصوص: به حجم واحد جرم ماده حجم مخصوص (Specific Volume) گفته می شود.

$$v = V / m$$

حجم مخصوص      حجم کل      جرم کل

جرم مخصوص: به جرم واحد حجم ماده جرم مخصوص (Specific mass) و یا چگالی گفته می شود.

$$\rho = m / V = 1 / v$$

جرم مخصوص      جرم کل      حجم کل      حجم مخصوص

## مفاهیم و تعاریف ابتدایی

ماده خالص:

ماده ای که ترکیب شیمیایی آن همگن و تغییر ناپذیر است، گرچه ممکن است در فازهای گوناگونی مانند بخار، مایع و یا جامد قرار داشته باشد.

فشار (Pressure): به توزیع نیرو بر روی سطح فشار گفته می شود.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 14.696 \text{ lbf/in.}^2$$

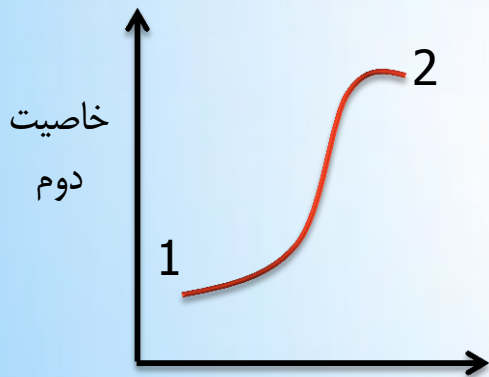
## مفاهیم و تعاریف ابتدایی

تعادل ترمودینامیکی:

اگر در یک سیستم هیچ گونه تفاوت فشار و تفاوت حرارتی وجود نداشته باشد، سیستم در حال تعادل خواهد بود.

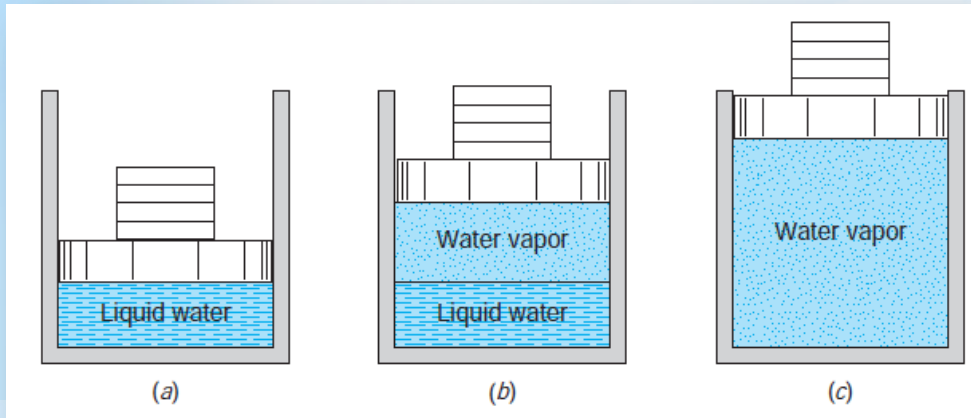
نکته مهم:

در ترمودینامیک کلاسیک، تمام فرآیندها را به صورت شبه تعادلی در نظر میگیریم. یعنی **فرض** میکنیم سیستم در حال طی کردن فرآیند از یک به دو، همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل باقی بماند.





## ماده ساده تراکم پذیر



تبادل فازهای مایع و بخار یک ماده ساده تراکم پذیر :

فرض کنید سیلندر حاوی آب که ابتدا در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد قرار دارد را گرما بدهیم.

با افزایش دما فشار ثابت بوده و حجم مخصوص آب کمی افزایش پیدا می کند.

پس از رسیدن به دمای ۹۹.۶ سانتیگراد، گرمای اضافی موجب تغییر فاز از مایع به بخار برای قسمت از آب میگردد. در این فرآیند دما و فشار ثابت بوده و حجم مخصوص مقدار قابل توجهی افزایش پیدا خواهد کرد.

پس از بخار شدن همه آب، گرمای اضافی موجب افزایش دما و حجم مخصوص خواهد شد.

برای یک فشار خاص، دمایی که در آن تبخیر آب آغاز می گردد را *دمای اشباع (Saturated temperature)* می نامیم. فشار مورد نظر را هم *فشار اشباع* برای آن دما می نامیم.

برای آب در دمای ۹۹.۶ سانتی گراد، فشار اشباع برابر با 0.1 Mpa می باشد. همچنین برای آب در فشار 0.1 Mpa دمای اشباع برابر با ۹۹.۶ سانتی گراد می باشد.

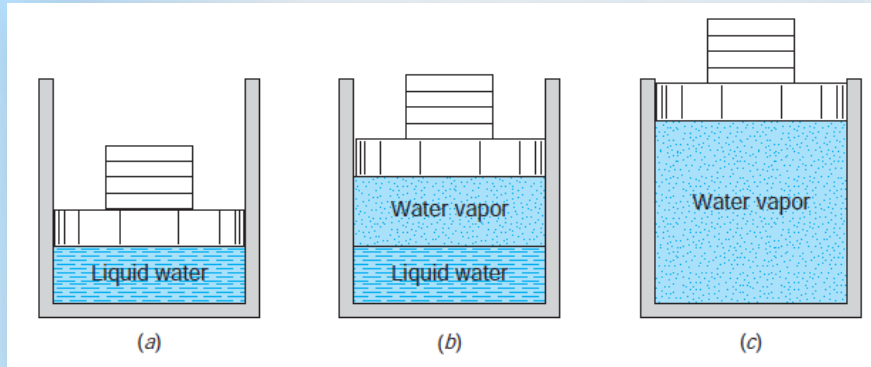
به مایعی که در فشار و دمای اشباع قرار دارد، مایع اشباع می گوئیم. اگر در فشار اشباع دمای آب زیر دمای اشباع باشد، به آن آب مادون سرد یا زیر سرد گفته می شود.

تعریف کیفیت (Quality): به نسبت جرم بخار به جرم کل ماده کیفیت آن گفته می شود. این تعریف فقط در حال اشباع که قسمتی از ماده به صورت مایع و قسمتی از آن به صورت بخار است مصداق دارد.

$$m_{\text{vapor}} = 0.2, m_{\text{total}} = 0.8$$
$$x = 0.2/0.8 = 0.25 = 25\%$$

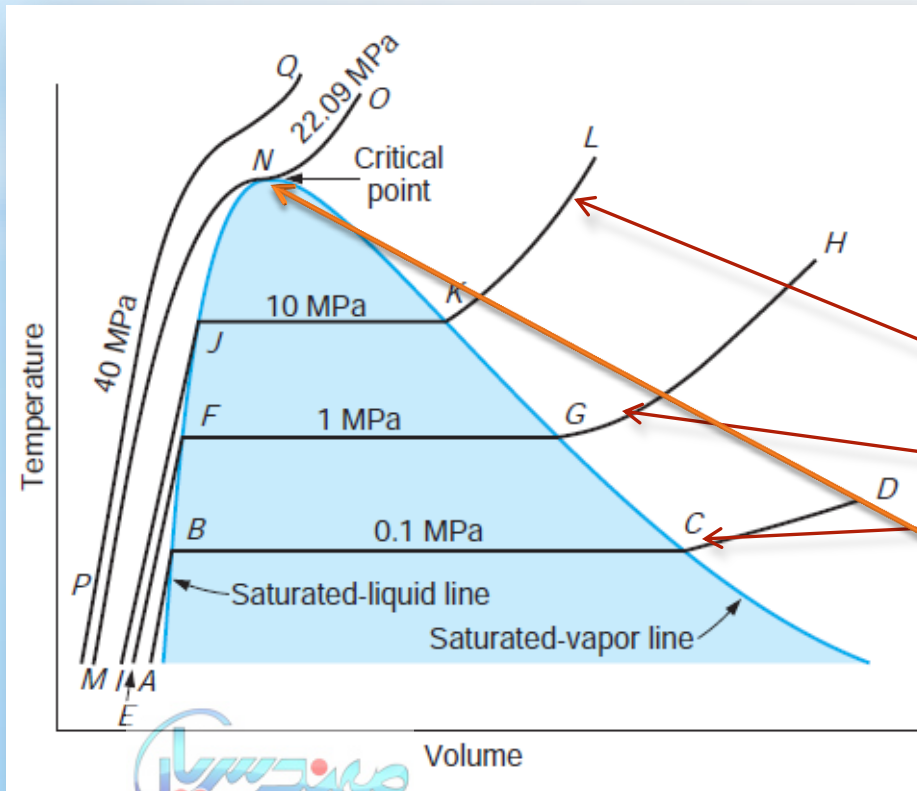
به ماده ای که کیفیت آن 100% است (همه جرم بخار است)، بخار اشباع گفته می شود. اگر دمای بخار از دمای اشباع بالاتر رود، به آن بخار مافوق اشباع (Superheat) گفته می شود.

# بررسی فرآیند اشباع بر روی نمودار دما بر حسب حجم



فرض کنید سیلندر حاوی آب که ابتدا در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد قرار دارد را در فشارهای مختلف و تا رسیدن به مرحله **superheat** گرما بدهیم.

با افزایش دما فشار ثابت بوده و حجم مخصوص آب کمی افزایش پیدا می کند (منطقه زیر سرد)



پس از رسیدن به دمای ۹۹.۶ سانتیگراد، گرمای اضافی موجب تغییر فاز از مایع به بخار برای قسمت از آب میگردد. در این فرآیند دما و فشار ثابت بوده و حجم مخصوص مقدار قابل توجهی افزایش پیدا خواهد کرد (منطقه اشباع)

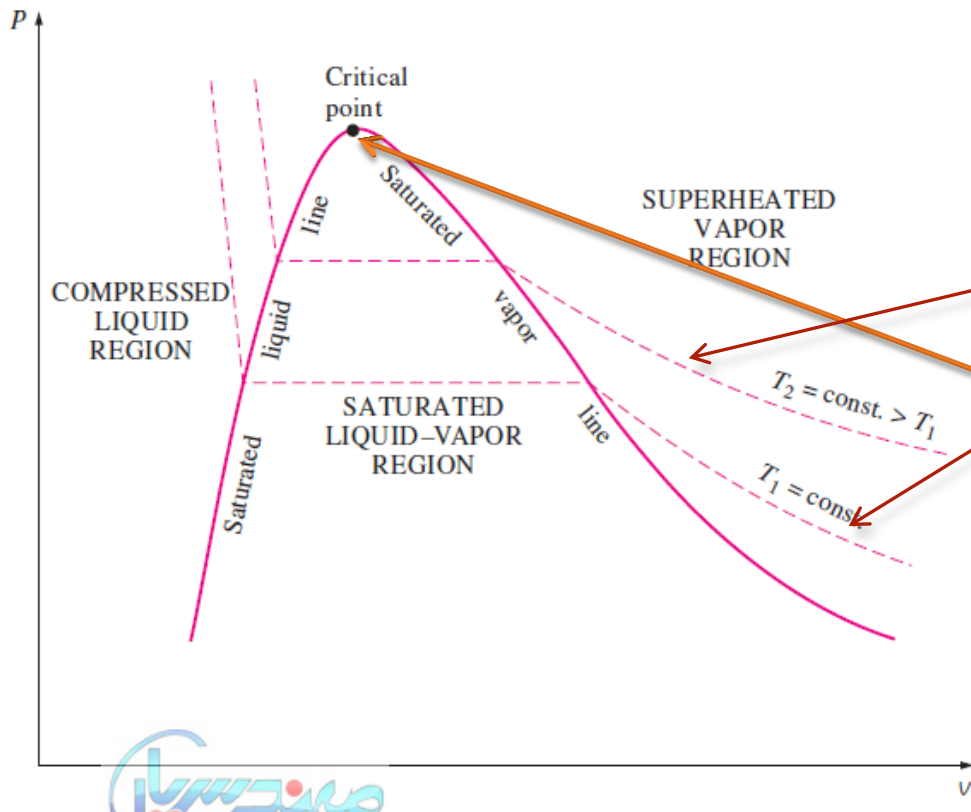
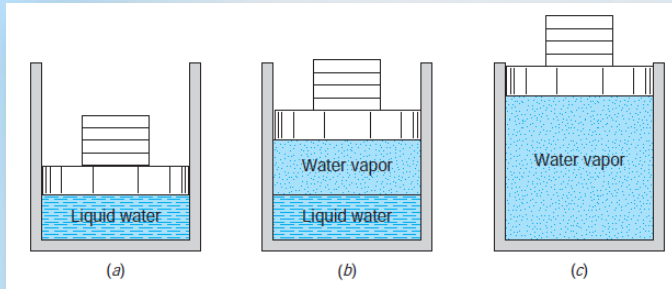
پس از بخار شدن همه آب، گرمای اضافی موجب افزایش دما و حجم مخصوص خواهد شد (منطقه مافوق گرم)

خطوط فشار ثابت

نقطه بحرانی (critical point)

# نمودار فشار بر حسب حجم

فرض کنید سیلندر حاوی آب که ابتدا در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد قرار دارد را در فشارهای مختلف و تا رسیدن به مرحله superheat گرما بدهیم.



خطوط دما ثابت

نقطه بحرانی (critical point)

حجم کل ماده در حالت اشباع برابر است با:

$$V = V_{\text{liq}} + V_{\text{vap}} = m_{\text{liq}} V_f + m_{\text{vap}} V_g$$

حجم مخصوص کل سیستم:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_{\text{liq}}}{m} v_f + \frac{m_{\text{vap}}}{m} v_g = (1 - x) v_f + x v_g$$

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



$$v = v_f + x v_{fg}$$

نکته مهم: با داشتن دو خاصیت مستقل از ماده مانند فشار و کیفیت، می توان وضعیت ماده را تعیین کرد.

برای مثال مایع اشباع و بخار اشباع هر دو درجه حرارت و فشار یکسانی دارند. بنابراین درجه حرارت و فشار دو کمیت مستقل **نیستند**. اما با داشتن کیفیت می توانیم حالت دقیق ماده را تعیین کنیم.

## جداول ترمودینامیکی:

با استفاده از جداول ترمودینامیکی می توانیم وضعیت یک ماده را با داشتن ۲ خاصیت مستقل کاملاً تعیین کنیم.

TABLE B.1.1  
Saturated Water

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

TABLE B.1.2  
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg		
		Sat. Liquid $v_f$	Evap. $u_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$
0.6113	0.01	0.001000	206.131	206.132
1	6.98	0.001000	129.20702	129.20802
1.5	13.03	0.001001	87.97913	87.98013
2	17.50	0.001001	67.00285	67.00385
2.5	21.08	0.001002	54.25285	54.25385
3	24.08	0.001003	45.66402	45.66502
4	28.96	0.001004	34.79915	34.80015
5	32.88	0.001005	28.19150	28.19251
7.5	40.29	0.001008	19.23674	19.23775
10	45.81	0.001010	14.67254	14.67355
15	53.97	0.001014	10.02117	10.02218
20	60.06	0.001017	7.64835	7.64937
25	64.97	0.001020	6.20322	6.20424
30	69.10	0.001022	5.22816	5.22918

## مساله نمونه:

برای آب با فشار 300 kpa و حجم مخصوص های زیر، درجه حرارت و مقدار کیفیت را تعیین نمایید.

$$v = 0.5 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ (الف)}$$

$$v = 1 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ (ب)}$$

الف) با مراجعه به جدول ترمودینامیک برای آب اشباع داریم:

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg		
		Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$
275	130.60	0.001070	0.65624	0.65731
300	133.55	0.001073	0.60475	0.60582
325	136.30	0.001076	0.56093	0.56201

توجه: در منطقه اشباع حجم مخصوص کل ماده بین حجم مخصوص مایع و بخار می باشد.  
در منطقه مادون سرد، حجم مخصوص کل ماده کمتر از حجم مخصوص مایع اشباع می باشد.  
در منطقه مافوق گرم حجم مخصوص کل ماده بیشتر از حجم مخصوص بخار می باشد.

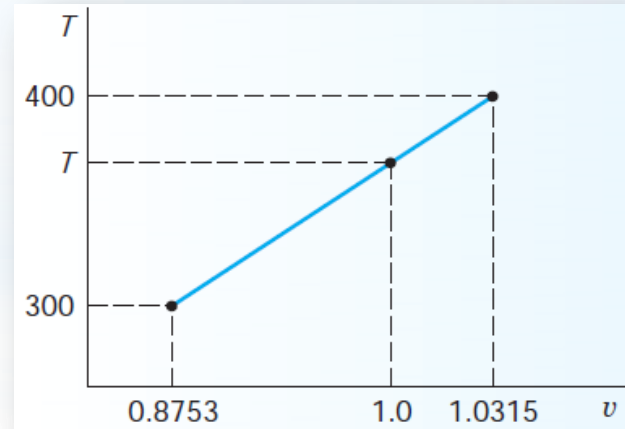
$P = 300 \text{ kpa} \rightarrow v_f < v < v_g \rightarrow$  ماده در حالت اشباع است

$$V = V_f + X V_{fg}$$

$$0.5 = 0.001073 + x 0.60475, \quad x = 0.825$$

ب) با مراجعه به جدول ترمودینامیک برای آب مافوق گرم داریم:

Temp. (°C)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)
300 kPa (133.55°C)			
250	0.79636	2728.69	2967.59
300	0.87529	2806.69	3069.28
400	1.03151	2965.53	3274.98
500	1.18669	3129.95	3485.96
600	1.34136	3300.79	3703.20



با توجه با اینکه تمامی ماده بخار است کیفیت برابر با ۱۰۰ می باشد. برای به دست آوردن دما در این حالت باید از روش میانبایی استفاده کنیم:

$$\text{slope} = \frac{T - 300}{1.0 - 0.8753} = \frac{400 - 300}{1.0315 - 0.8753}$$

$$T = 379.8^\circ\text{C}.$$



مساله نمونه:

برای آب با دمای 200 C و حجم مخصوص  $v = 0.4 \text{ m}^3/\text{kg}$  فشار را تعیین نمایید.

با مراجعه به جدول ترمودینامیک برای آب اشباع داریم:

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$
195	1397.8	0.001149	0.13990	0.14105
200	1553.8	0.001156	0.12620	0.12736

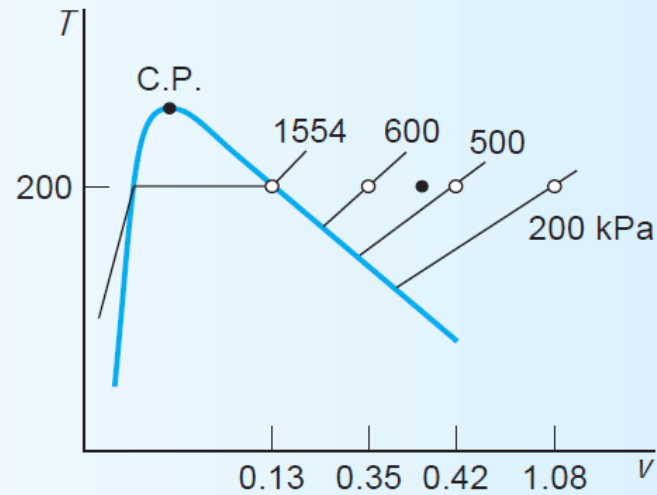
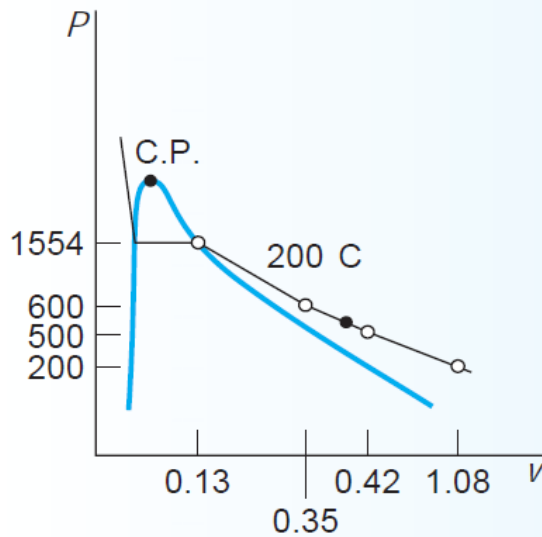
ماده در حالت مافوق گرم (superheat) است  $\rightarrow v_g < v$

بنابراین باید به جدول superheat آب مراجعه کنیم:

	500 kPa (151.86°C)		
Sat.	0.37489	2561.23	2748.67
200	0.42492	2642.91	2855.37
250	0.47436	2723.50	2960.68

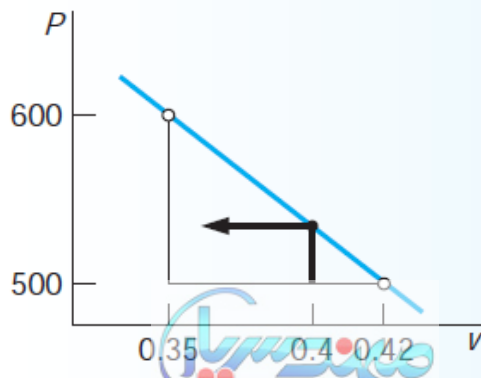
	600 kPa (158.85°C)		
Sat.	0.31567	2567.40	2756.80
200	0.35202	2638.91	2850.12
250	0.39383	2720.86	2957.16

نتیجه: فشار بخار بین 500 kpa و 600 kpa می باشد.



## نمودارهای $T-v$ و $P-v$

اکنون با داشتن حجم مخصوص برای حالت مورد نظر مساله و فشارهای 500 kpa و 600 kpa ، با استفاده از روش میانجیابی فشار مربوط به حالت مورد نظر را به دست می آوریم:



$$P = 500 + (600 - 500) \frac{0.4 - 0.42492}{0.35202 - 0.42492} = 534.2 \text{ kPa}$$

# مفهوم کار در سیستم های ترمودینامیکی:

در اثر اعمال نیروی  $F$  به مرزهای یک سیستم ترمودینامیکی و جابجا شدن آن، کار انجام خواهد شد.

$$W = \int_1^2 F dx$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$$

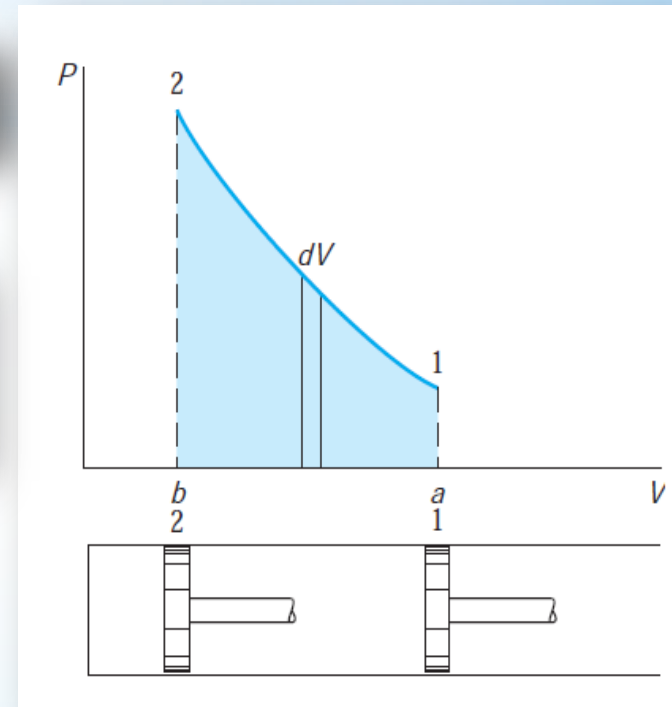
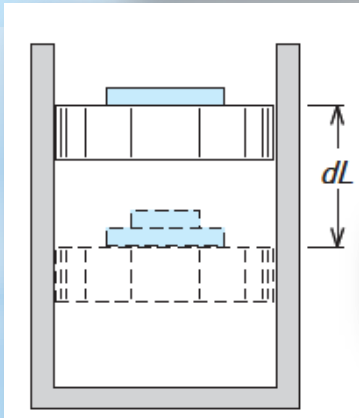
فرض کنید در اثر اعمال فشار داخل پیستون، سیلندر به مقدار  $dL$  بالا برود. با جایگذاری نیرو به صورت حاصلضرب فشار در سطح مقطع خواهیم داشت:

$$\delta W = PA dL$$

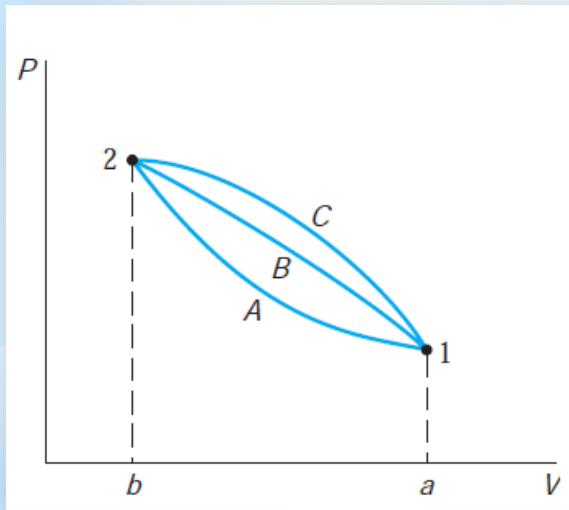
$$\delta W = P dV$$

$${}_1 W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 P dV$$

کار انجام شده برابر با مساحت زیر نمودار  $P-V$  می باشد.



توجه: کار انجام شده در یک فرایند نه تنها فقط به نقاط شروع و پایان، بلکه به مسیر پیموده شده هم بستگی دارد.



کار انجام شده توسط سیستم را مثبت و کار انجام شده بر روی سیستم را منفی در نظر می گیریم.

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

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

کار در فرآیند فشار ثابت:

$$PV = mRT$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

کار در فرآیند دما ثابت:

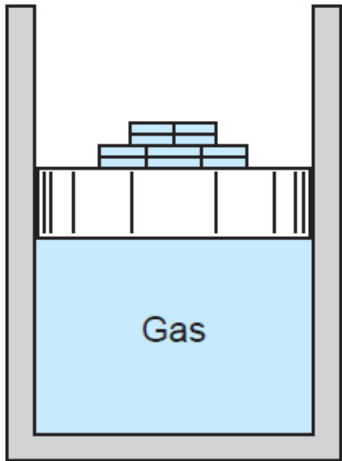
$$PV^n = \text{constant} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

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

کار در فرآیند پلی تروپیک:

## مساله نمونه:

سیلندری که مشاهده می کنید حاوی گازی با فشار 200 kpa و حجم  $0.04 \text{ m}^3$  می باشد. مقدار کمی وزنه هم بر روی پیستون قرار دارد. در صورتی که با حرارت دادن حجم را به  $0.1 \text{ m}^3$  برسانیم، کار انجام شده توسط سیستم در این فرایند را محاسبه نمایید.



$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

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

کار در فرآیند فشار ثابت:

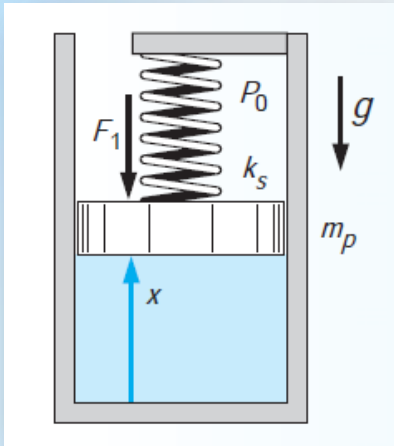
$$\longrightarrow {}_1W_2 = 200 \text{ kPa} \times (0.1 - 0.04) \text{ m}^3 = 12.0 \text{ kJ}$$

حال فرض کنید وزنه ها را طوری از روی پیستون برداریم که دما ثابت بماند. در این حالت کار انجام شده برابر است با:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 200 \text{ kPa} \times 0.04 \text{ m}^3 \times \ln \frac{0.10}{0.04} = 7.33 \text{ kJ}$$

## سیلندر متصل به فنر:

سیلندری که مشاهده می کنید از بالا به یک فنر با سختی  $k_s$  متصل شده است و نیروی برابر با  $F_1$  هم به آن وارد می گردد. جرم پیستون هم برابر  $m_p$  می باشد. در این حالت کار انجام شده برابر است با:



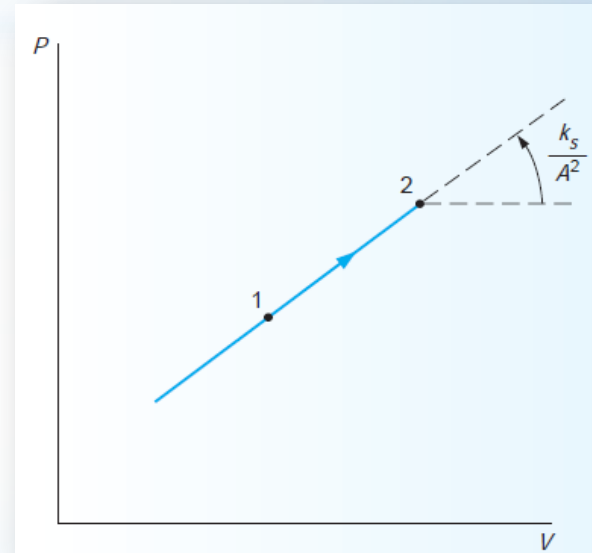
$$\sum F_{\uparrow} = PA, \quad \sum F_{\downarrow} = m_p g + P_0 A + k_s(x - x_0) + F_1$$

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

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

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \text{area under the process curve}$$

$${}_1W_2 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)(V_2 - V_1)$$



## مساله نمونه:

سیلندری که مشاهده می کنید حاوی 0.5 Kg آمونیاک در دمای  $20^\circ\text{C}$  و با کیفیت 25% می باشد. با گرما دادن دمای آمونیاک به  $20^\circ\text{C}$  رسانده شده و حجم آن نیز 1.41 برابر می گردد. فشار نهایی و کار انجام شده توسط آمونیاک را بیابید.

با مراجعه به جدول ترمودینامیک داریم:

$$P_1 = P_{\text{sat}} = 190.2 \text{ kPa}$$

$$v_1 = v_f + x_1 v_{fg} = 0.001504 + 0.25 \times 0.62184 = 0.15696 \text{ m}^3/\text{kg}$$

TABLE B.2.1

### Saturated Ammonia

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Evap. $u_{fg}$	Sat. Vapor $u_g$
-20	190.2	0.001504	0.62184	0.62334	88.76	1210.7	1299.5
20	857.5	0.001638	0.14758	0.14922	272.89	1059.3	1332.2

$v_2 = 1.41 v_1 = 1.41 \times 0.15696 = 0.2213 \text{ m}^3/\text{kg}$  برای وضعیت ۲ داریم:  $v_g < v_2$  → ماده در حالت مافوق گرم (superheat) است

TABLE B.2.2 (continued)

### Superheated Ammonia

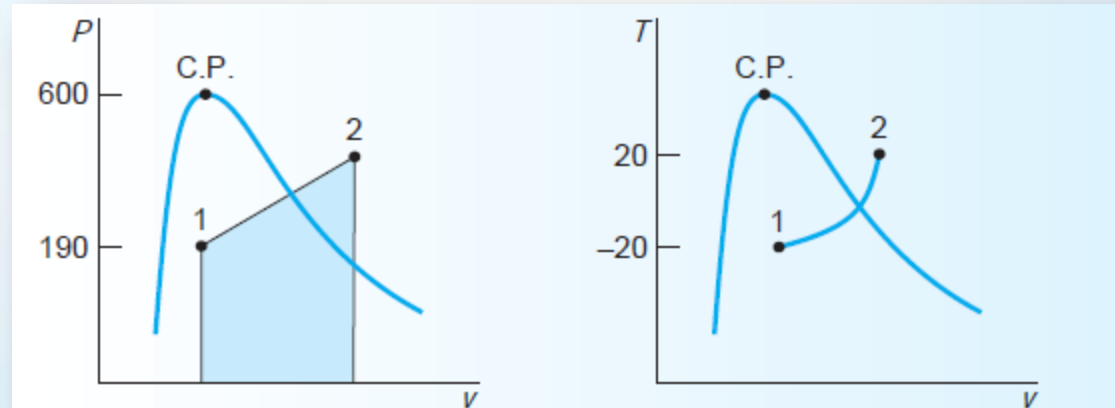
Temp. (°C)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)
500 kPa (4.13°C)					600 kPa (9.28°C)			
Sat.	0.25035	1321.3	1446.5	5.2776	0.21038	1325.2	1451.4	5.2133
10	0.25757	1333.5	1462.3	5.3340	0.21115	1326.7	1453.4	5.2205
20	0.26949	1353.6	1488.3	5.4244	0.22154	1347.9	1480.8	5.3156

## مساله نمونه:

سیلندری که مشاهده می کنید حاوی 0.5 Kg آمونیاک در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و با کیفیت 25% می باشد. با گرما دادن دمای آمونیاک به  $20^{\circ}\text{C}$  رسانده شده و حجم آن نیز 1.41 برابر می گردد. فشار نهایی و کار انجام شده توسط آمونیاک را بیابید.

$$P = C_1 + C_2 v$$

$$\begin{aligned} {}_1W_2 &= \int_1^2 P dV = \int_1^2 P m dv = \text{area} = m \frac{1}{2} (P_1 + P_2)(v_2 - v_1) \\ &= 0.5 \text{ kg} \frac{1}{2} (190.2 + 600) \text{ kPa} (0.2213 - 0.15696) \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 12.71 \text{ kJ} \end{aligned}$$





# قانون اول ترمودینامیک

## مفهوم گرما:

به صورتی از انرژی که در مرز های سیستم و از قسمت با درجه حرارت بالاتر به قسمت با درجه حرارت پایین تر منتقل می گردد **گرما** گفته می شود.

توجه ۱: هیچ جسمی حاوی گرما نیست، بلکه اجسام فقط انرژی دارند. با قرار گرفتن دو جسم با حرارت های مختلف در نزدیکی یکدیگر، پدیده انتقال گرما روی می دهد.

توجه ۲: گرمای داده شده به سیستم را مثبت و گرمای انتقال پیدا کرده از سیستم را منفی در نظر می گیریم.

توجه ۳: به فرآیندی که در آن هیچ گونه انتقال گرما (انتقال حرارت) روی ندهد فرآیند آدیاباتیکی می گوئیم.

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



گرمای منتقل شده در فرآیند از نقطه ۱ به ۲ :

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



نرخ انتقال گرما (حرارت)

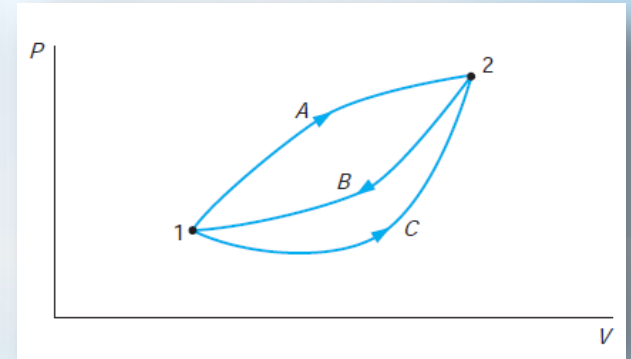
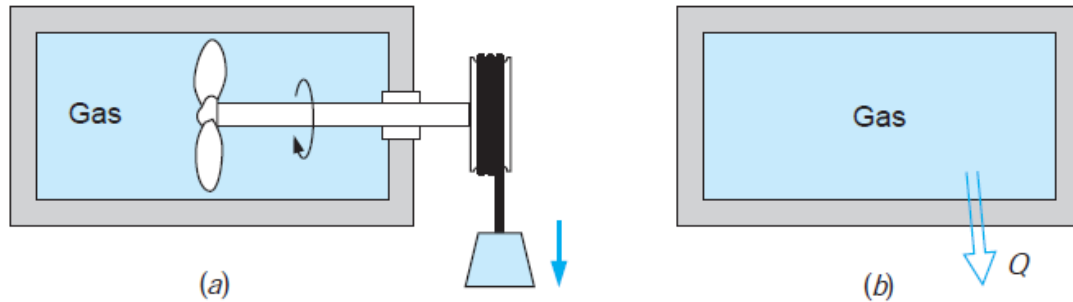
$$q \equiv \frac{Q}{m}$$



انتقال گرمای مخصوص

# قانون اول ترمودینامیک برای یک چرخه (cycle)

فرض کنید یک جرم کنترل داریم که یک سیکل (چرخه) را می‌پیماید.



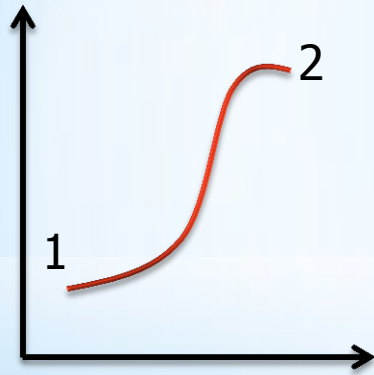
طبق قانون اول ترمودینامیک، پس از رسیدن به نقطه ابتدایی چرخه، انتگرال سیکلی گرما با انتگرال سیکلی کار برابر می‌باشد:

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

به عبارت دیگر، مجموع گرمای داده شده به سیستم در یک چرخه، برابر با مجموع کار انجام شده توسط سیستم می‌باشد.

# قانون اول ترمودینامیک برای یک فرآیند (process)

فرض کنید یک جرم کنترل داریم که یک فرآیند (process) را از حالت 1 به حالت 2 می پیماید.



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

تغییر کل انرژی  
سیستم

گرمای داده شده  
به سیستم

کار انجام شده  
توسط سیستم

$$E = U + KE + PE$$

انرژی کل سیستم  
انرژی داخلی  
انرژی جنبشی  
انرژی پتانسیل

$$KE = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$$

$$PE_2 - PE_1 = mg(Z_2 - Z_1)$$

$$U_2 - U_1 + \frac{m(\mathbf{v}_2^2 - \mathbf{v}_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

## معرفی پارامتر $U$ (انرژی داخلی)

$$U_2 - U_1 + \frac{m(\mathbf{V}_2^2 - \mathbf{V}_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

$$u = U / m$$

انرژی داخلی کل

انرژی داخلی مخصوص ( $u$ ) خاصیت متمرکز (مستقل از مقدار ماده می باشد). این کمیت به صورت نسبی تعریف می گردد: انرژی داخلی آب در دمای 0.01 C برابر با صفر در نظر گرفته می شود.

در جداول ترمودینامیکی، مقدار  $u$  به عنوان یک خاصیت مستقل برای آب و بخار در حالت ها اشباع، superheat و ... داده شده است.

$$u = u_f + Xu_{fg}$$

انرژی داخلی مخصوص

انرژی داخلی  
مایع اشباع

کیفیت

تفاضل انرژی داخلی بخار اشباع

و مایع اشباع:  $u_g - u_f$

## مساله نمونه

خواص ترمودینامیکی آب  $(x, v, P)$  برای هر یک از حالات داده شده را به دست آورید:

a.  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $u = 2780 \text{ kJ/kg}$

b.  $P = 2000 \text{ kPa}$ ,  $u = 2000 \text{ kJ/kg}$

توجه: در منطقه اشباع انرژی داخلی کل ماده بین انرژی داخلی مایع و بخار اشباع می باشد.  
در منطقه مادون سرد، انرژی داخلی کل ماده کمتر از انرژی داخلی مایع اشباع می باشد.  
در منطقه مافوق گرم انرژی داخلی کل ماده بیشتر از انرژی داخلی بخار اشباع می باشد.

$u = 2562 \text{ kJ/kg}$

با مراجعه به جداول ترمودینامیکی برای آب اشباع دمای  $T = 300^\circ\text{C}$  داریم:

Internal Energy, kJ/kg		
Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor
$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$
1331.97	1230.99	2562.96

برای حالت a :

$u_g < u$



ماده در حالت مافوق گرم (superheat) است.

## مساله نمونه

خواص ترمودینامیکی ( $x, v, P$ ) برای هر یک از حالات داده شده را به دست آورید:

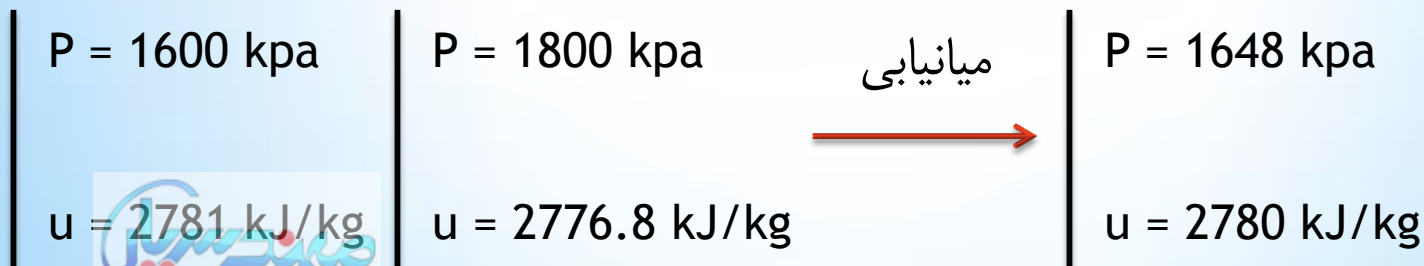
a.  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $u = 2780 \text{ kJ/kg}$

b.  $P = 2000 \text{ kPa}$ ,  $u = 2000 \text{ kJ/kg}$

بنابراین برای به دست آوردن فشار در حالت a به جدول بخار مافوق گرم (superheat) مراجعه می کنیم:

TABLE B.1.3 (continued)  
Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)
1600 kPa (201.40)°C					1800 kPa (207.15)°C			
Sat.	0.12380	2595.95	2794.02	6.4217	0.11042	2598.38	2797.13	6.3793
250	0.14184	2692.26	2919.20	6.6732	0.12497	2686.02	2910.96	6.6066
300	0.15862	2781.03	3034.83	6.8844	0.14021	2776.83	3029.21	6.8226



## مساله نمونه

خواص ترمودینامیکی ( $x, v, P$ ) برای هر یک از حالات داده شده را به دست آورید:

a.  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $u = 2780 \text{ kJ/kg}$

b.  $P = 2000 \text{ kPa}$ ,  $u = 2000 \text{ kJ/kg}$

برای حالت b داریم:

TABLE B.1.2 (continued)  
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Evap. $u_{fg}$	Sat. Vapor $u_g$
1750	205.76	0.001166	0.11232	0.11349	876.44	1721.39	2597.83
2000	212.42	0.001177	0.09845	0.09963	906.42	1693.84	2600.26

ماده در ناحیه دوفازی و یا اشباع است.  $u < u_g$   $\longrightarrow$   
بنابراین دما برابر با دمای اشباع ( $T = 212.42^\circ\text{C}$ ) می باشد.

$$u = 2000 = 906.4 + x1693.8, \quad x = 0.6456$$

برای حجم مخصوص داریم:

$$v = 0.001177 + 0.6456 \times 0.09845 = 0.06474 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

## مساله نمونه

یک مخزن با حجم  $5 \text{ m}^3$  حاوی  $0.05 \text{ m}^3$  آب مایع اشباع و  $4.95 \text{ m}^3$  بخار اشباع در فشار  $0.1 \text{ MPa}$  می باشد. به این مخزن مقداری حرارت انتقال داده می شود تا اینکه ماده کاملاً به بخار اشباع تبدیل گردد. مقدار گرمای داده شده را بیابید.

~~$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2$$~~

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1$$

$$m_{1 \text{ liq}} = \frac{V_{\text{liq}}}{v_f} = \frac{0.05}{0.001043} = 47.94 \text{ kg}$$

$$m_{1 \text{ vap}} = \frac{V_{\text{vap}}}{v_g} = \frac{4.95}{1.6940} = 2.92 \text{ kg}$$

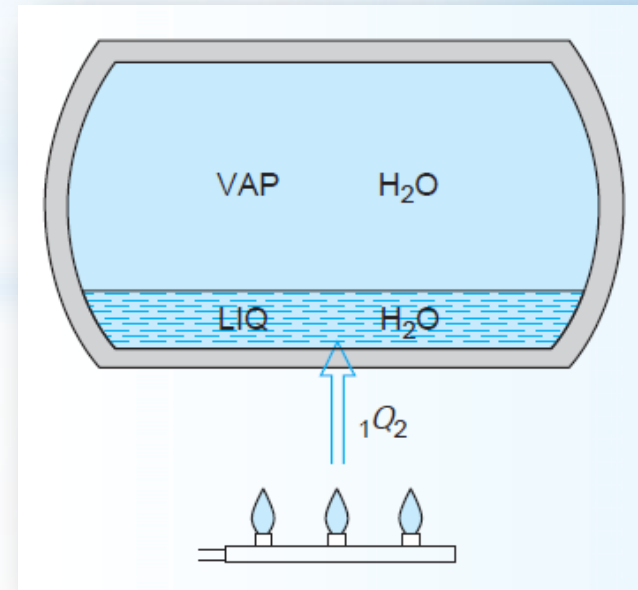
$$U_1 = m_{1 \text{ liq}} u_{1 \text{ liq}} + m_{1 \text{ vap}} u_{1 \text{ vap}}$$

$$= 47.94(417.36) + 2.92(2506.1) = 27\,326 \text{ kJ}$$

$$m = m_{1 \text{ liq}} + m_{1 \text{ vap}} = 47.94 + 2.92 = 50.86 \text{ kg}$$

$$v_2 = \frac{V}{m} = \frac{5.0}{50.86} = 0.09831 \text{ m}^3/\text{kg}$$

از قانون اول ترمودینامیک داریم:





$$m = m_{1 \text{ liq}} + m_{1 \text{ vap}} = 47.94 + 2.92 = 50.86 \text{ kg}$$

$$v_2 = \frac{V}{m} = \frac{5.0}{50.86} = 0.09831 \text{ m}^3/\text{kg}$$

با مراجعه به جدول آب اشباع داریم:

TABLE B.1.2 (continued)  
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_{fg}$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Evap. $u_{fg}$	Sat. Vapor $u_g$
1750	205.76	0.001166	0.11232	0.11349	876.44	1721.39	2597.83
2000	212.42	0.001177	0.09845	0.09963	906.42	1693.84	2600.26

$$\left| \begin{array}{l} u_g = 2597.83 \text{ kJ/kg} \\ v_g = 0.11349 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} u_g = 2600.26 \text{ kJ/kg} \\ v_g = 0.09963 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right| \xrightarrow{\text{میانمایی}} \left| \begin{array}{l} u_g = 2600.5 \text{ kJ/kg} \\ v_g = 0.09831 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right|$$

$$\frac{0.011349 - 0.09963}{2597.83 - 2600.26} = \frac{0.011349 - 0.09831}{2597.83 - u_g}$$

$$u_2 = 2600.5 \text{ kJ/kg}$$

$$U_2 = mu_2 = 50.86(2600.5) = 132\,261 \text{ kJ}$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 = 132\,261 - 27\,326 = 104\,935 \text{ kJ}$$

## معرفی پارامتر انتالپی

در صورتی که هیچ گونه تغییری در انرژی جنبشی و پتانسیل نداشته باشیم، قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر در می آید:

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

در صورت ثابت بودن فشار داریم:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

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

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + P_2 V_2 - P_1 V_1 \\ &= (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1) \end{aligned}$$

$$H \equiv U + PV$$

$$h \equiv u + Pv$$

انتالپی

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

انتالپی مخصوص



مایع

انتالپی اشباع

کیفیت

تفاضل انتالپی بخار اشباع و

مایع اشباع:  $h_g - h_f$

## مفهوم گرمای ویژه:

به مقدار گرمایی که باید به واحد جرم ماده داده شود تا درجه حرارتش یک درجه افزایش پیدا کند، گرمای ویژه می‌گوییم:  
گرمای ویژه **حجم ثابت**:

$$\delta Q = dU + \delta W = dU + P dV$$

$$C_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$C_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

گرمای ویژه **فشار ثابت**:

برای جامدات و مایعات مقدار گرمای ویژه حجم ثابت و فشار ثابت تقریباً برابر است:

$$dh = du + d(Pv) \approx du + v dP$$

$$dh \approx du \approx C dT$$

برای گاز های ایده آل انرژی داخلی فقط تابعی از درجه حرارت گاز می باشد. بنابراین:

$$C_{v0} = \frac{du}{dT}$$

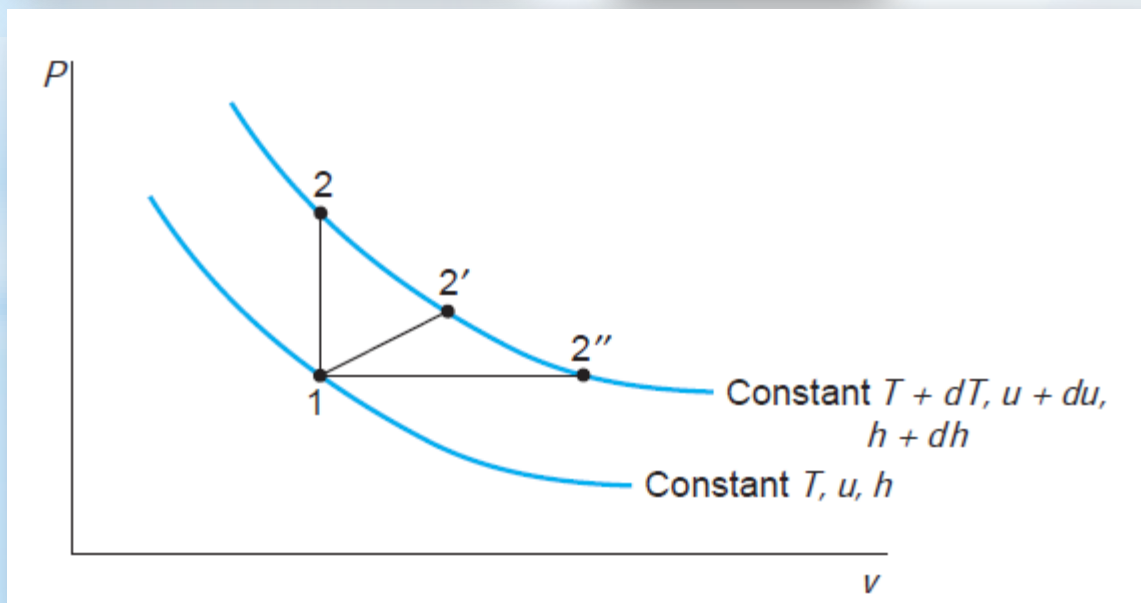
$$du = C_{v0} dT$$

$$dU = mC_{v0} dT$$

$$h = u + Pv = u + RT$$

$$C_{p0} = \frac{dh}{dT}$$

$$dH = mC_{p0} dT$$



$$dh = du + R dT$$

$$C_{p0} dT = C_{v0} dT + R dT$$

$$C_{p0} - C_{v0} = R$$

## مساله نمونه

حجم ابتدایی یک سیلندر که حاوی گاز نیتروژن با فشار 150 Kpa و دمای 25°C است برابر با 0.1 m<sup>3</sup> می باشد. با حرکت پیستون، فشار گاز به 1 Mpa و دمایش به 150°C افزایش پیدا می کند. در این فرآیند 20 kJ کار بر روی گاز انجام می گردد. میزان انتقال حرارت فرآیند را بیابید.

از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + {}_1W_2$$

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

Gas	Chemical Formula	Molecular Mass (kg/kmol)	R (kJ/kg-K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p0}$ (kJ/kg-K)	$C_{v0}$ (kJ/kg-K)	$k = \frac{C_p}{C_v}$
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.013	0.2968	1.13	1.042	0.745	1.400

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

جرم نیتروژن برابر است با: (پارامتر  $R$  را از جدول ترمودینامیک به دست می آوریم).

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= mC_{v0}(T_2 - T_1) + {}_1W_2 \\ &= 0.1695 \text{ kg} \times 0.745 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (150 - 25) \text{ K} - 20.0 \\ &= 15.8 - 20.0 = -4.2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

با فرض ثابت بودن گرمای ویژه داریم:

# قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

شکل کلی قانون اول ترمودینامیک:

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

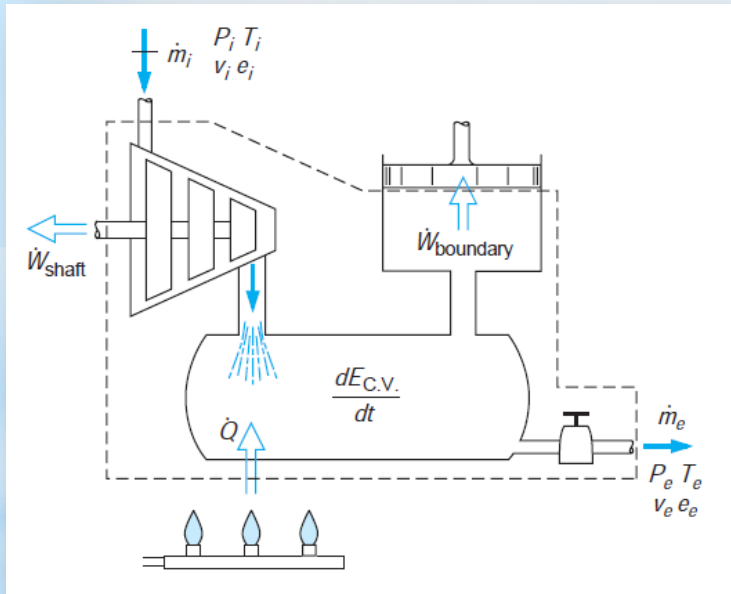
برای حجم کنترل داریم:

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{CV}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{CV}/dt$$

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

سرعت متوسط جریان



نرخ تغییرات انرژی کل سیستم

$$\frac{dE_{C.V.}}{dt} = \underbrace{\dot{Q}_{C.V.}}_{\text{کار انجام شده گرمای داده شده توسط سیستم}} - \underbrace{\dot{W}_{C.V.}}_{\text{انرژی کل جریان ورودی}} + \underbrace{\sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} \mathbf{v}_i^2 + gZ_i \right)}_{\text{انرژی کل جریان خروجی}} - \underbrace{\sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} \mathbf{v}_e^2 + gZ_e \right)}_{\text{انرژی کل جریان خروجی}}$$

## قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

در بسیاری از سیستم های ترمودینامیکی مانند کمپرسور ها، بویلرها و توربین ها، حجم کنترل مورد نظر در وضعیت پایدار قراردادار. در این وضعیت داریم:

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

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

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

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

در صورتی که فقط یک جریان ورودی و یک جریان خروجی داشته باشیم:

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

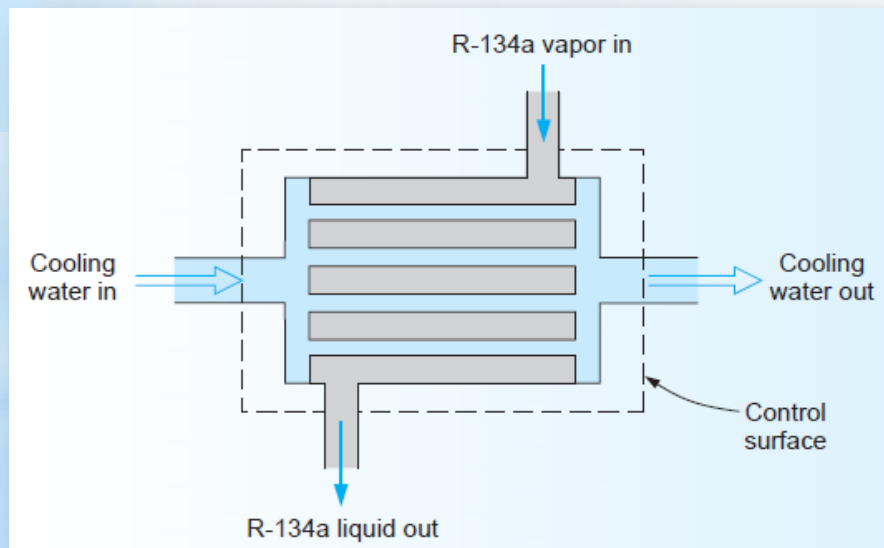
$$q + h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2} + gZ_e + w$$

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

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

# مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک

مبدل گرمایی (heat exchanger) وسیله ای است تشکیل شده از یک سیستم لوله کشی که از آن برای حرارت دادن و یا سرد کردن جریان سیال استفاده می گردد. برای مثال، کندانسور که از آن برای تقطیر گازها استفاده می گردد هم نوعی مبدل گرمایی به شمار می رود.



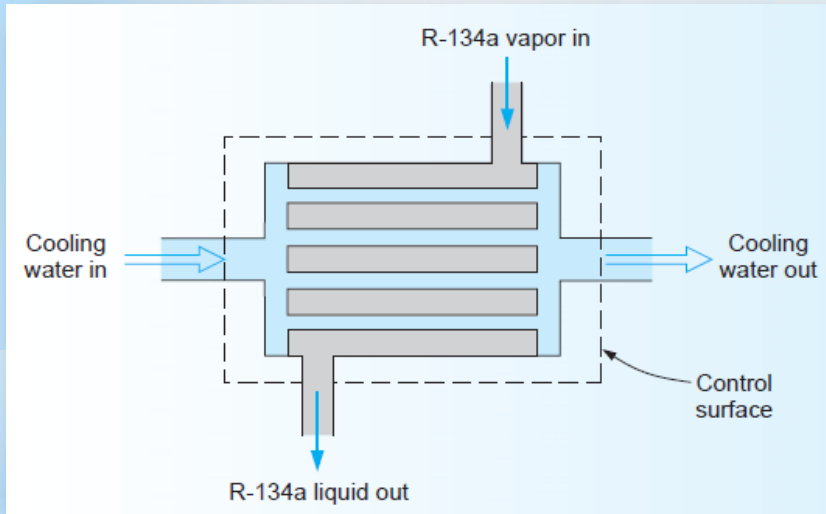
فرض کنید بخار R134 a با نرخ جریان  $0.2 \text{ kg/s}$  و در فشار  $1 \text{ Mpa}$  و دمای  $60^\circ\text{C}$  وارد این کندانسور شده و با فشار  $0.95 \text{ Mpa}$  و دمای  $35^\circ\text{C}$  به صورت مایع از آن خارج گردد. این خنک شدن توسط جریان آبی که با دمای  $10^\circ\text{C}$  وارد شده و با دمای  $20^\circ\text{C}$  خارج می شود صورت می پذیرد. نرخ جرمی جریان آب را بیابید.

$$\cancel{\dot{Q}_{\text{C.V.}}} + \sum \cancel{\dot{m}_i} \left( \cancel{h_i} + \cancel{\frac{v_i^2}{2}} + \cancel{gZ_i} \right) = \sum \cancel{\dot{m}_e} \left( \cancel{h_e} + \cancel{\frac{v_e^2}{2}} + \cancel{gZ_e} \right) + \cancel{\dot{W}_{\text{C.V.}}}$$

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



# مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک



از جداول ترمودینامیکی داریم:

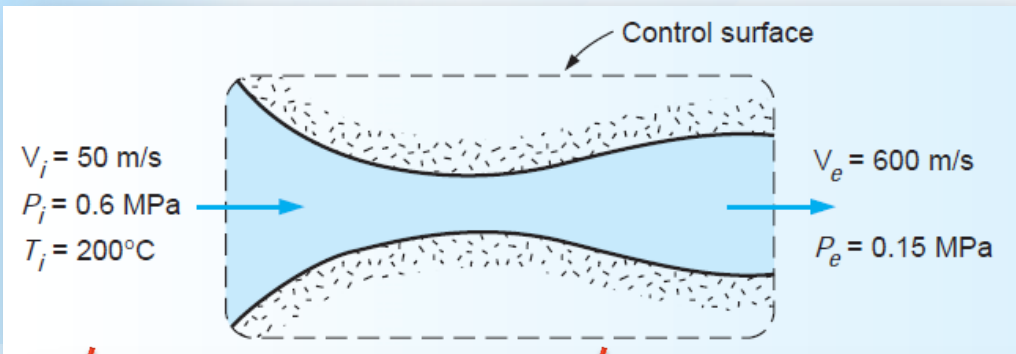
$$(h_i)_r = 441.89 \text{ kJ/kg}, \quad (h_i)_w = 42.00 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_e)_r = 249.10 \text{ kJ/kg}, \quad (h_e)_w = 83.95 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_r \frac{(h_i - h_e)_r}{(h_e - h_i)_w} = 0.2 \text{ kg/s} \frac{(441.89 - 249.10) \text{ kJ/kg}}{(83.95 - 42.00) \text{ kJ/kg}} = 0.919 \text{ kg/s}$$

# مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک

نازل (nozzle) وسیله ای است که از آن برای ایجاد جریان سیال با سرعت های بالا استفاده می گردد.



فرض کنید جریان بخار با فشار 0.6 Mpa ، دمای 200 °C و سرعت 50 m/s وارد نازل شود. اگر جریان نازل را با فشار 0.15 Mpa و سرعت 600 m/s ترک کند، درجه حرارت جریان خروجی و کیفیت آن را بیابید.

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

$$h_i + \frac{\mathbf{v}_i^2}{2} = h_e + \frac{\mathbf{v}_e^2}{2}$$

با مراجعه به جدول ترمودینامیک داریم:

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

TABLE B.1.2 (continued)  
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Evap. $s_{fg}$	Sat. Vapor $s_g$
150	111.37	467.08	2226.46	2693.54	1.4335	5.7897	7.2232

$T = 111.37 \text{ }^\circ\text{C}$

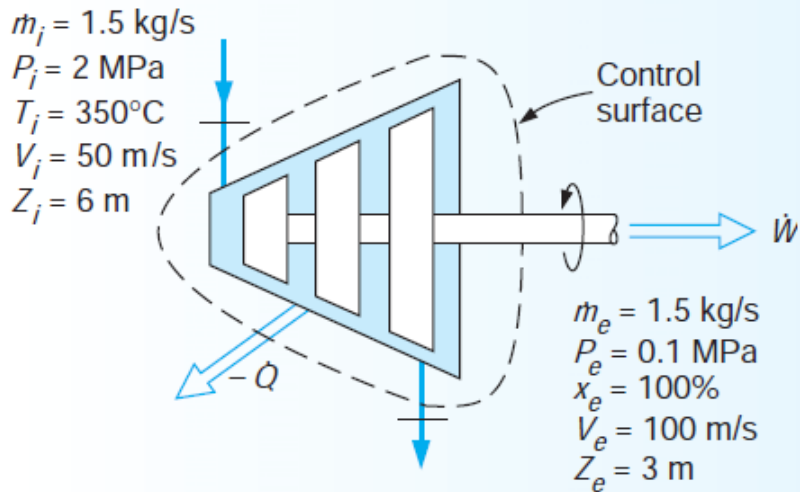
$$h = h_f + x h_{fg}$$

$$2671.4 = 467.1 + x_e 2226.5$$

$$x_e = 0.99$$

# مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک

**توربین:** توربین وسیله ای است که از آن برای تولید کار با استفاده از فشار سیال استفاده می گردد.



نرخ جرمی جریان ورودی به یک توربین بخار برابر با  $1.5 \text{ kg/s}$  و نرخ گرمای داده شده به توربین هم برابر با  $8.5 \text{ Kw}$  می باشد. مشخصات جریان های ورودی و خروجی را هم می توانید مشاهده کنید. کار خروجی توربین را محاسبه نمایید.

	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
$g = 9.8066 \text{ m/s}^2$		

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

از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\dot{Q}_{C.V.} = -8.5 \text{ kW}$$

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

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

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

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

## مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک

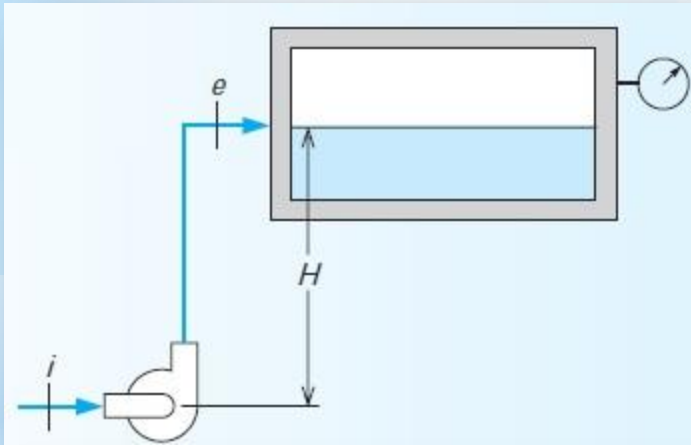
با جایگذاری مقادیر در رابطه قانون اول ترمودینامیک داریم:

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

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

# مثال هایی از کاربردهای عملی قانون اول ترمودینامیک

**پمپ و کمپرسور:** از پمپ ها برای افزایش فشار مایعات و از کمپرسور ها برای افزایش فشار گاز ها استفاده می گردد. در هر دو وسیله این فرآیند با دریافت کار صورت می پذیرد.



یک پمپ آب، آب را در دمای  $10^{\circ} \text{C}$  و فشار  $90 \text{ kPa}$  دریافت کرده و به ارتفاع  $15 \text{ m}$  می فرستد. لوله خروجی پمپ قطری برابر با  $0.04 \text{ m}$  دارد و به مخزنی با فشار  $400 \text{ kPa}$  متصل شده است. با فرض آدیاباتیک بودن فرآیند، برابر بودن سرعت های ورودی و خروجی و دمای آب خروجی  $10^{\circ} \text{C}$ ، توان مورد نیاز برای پمپ را بیابید.

$$\dot{m} \left( h_{in} + \frac{1}{2} v_{in}^2 + gZ_{in} \right) = \dot{m} \left( h_{ex} + \frac{1}{2} v_{ex}^2 + gZ_{ex} \right) + \dot{W}$$

$$\dot{W} = \dot{m}(h_{in} + gZ_{in} - h_{ex} - gZ_{ex})$$

قانون اول  
ترمودینامیک:

توجه ۱: به علت ثابت بودن دمای آب، انرژی داخلی آن هم ثابت باقی خواهد ماند. پس برای تغییرات انتالپی داریم:

$$h_{in} - h_{ex} = (u + P_{in} v_{in}) - (u + P_{ex} v_{ex}) = P_{in} v_{in} - P_{ex} v_{ex} = (P_{in} - P_{ex}) v$$

توجه ۲: به علت غیر قابل تراکم بودن آب، تغییرات حجم مخصوص آن بسیار ناچیز خواهد بود:

$$\dot{W} = \dot{m}[g(Z_{in} - Z_{ex}) - (P_{ex} - P_{in})v]$$

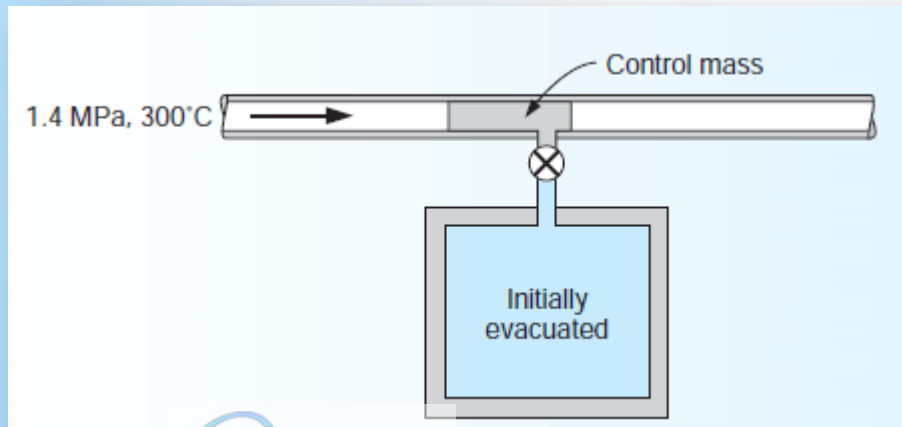
$$= 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left[ 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{-15 - 0}{1000} \text{m} - (400 + 101.3 - 90) \text{kPa} \times 0.001001 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

$$= 1.5 \times (-0.447 - 0.412) = -0.84 \text{ kW}$$

# قانون اول ترمودینامیک برای حالت گذرا

در مواردی مانند پر کردن یک مخزن و یا تخلیه یک محفظه حاوی سیالات، باید قانون اول ترمودینامیک را به صورت گذرا به کار ببریم:

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{Q_{c.v.} + \sum m_i \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i \right)}^{\text{جریان ورودی}} \\
 & = \sum m_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) \quad \text{جریان خروجی} \\
 & + \underbrace{\left[ m_2 \left( u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) \right]}_{\text{وضعیت انتهایی}} - \underbrace{\left[ m_1 \left( u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]}_{\text{وضعیت ابتدایی}} \Big]_{c.v.} + W_{c.v.}
 \end{aligned}$$



بخار آب با فشار 1.4 Mpa و دمای 300°C داخل یک لوله جریان دارد. با باز شدن یک شیر، مخزنی که در ابتدا خالی است از گاز پر می شود تا به فشار 1.4 Mpa برسد و در انتها شیر بسته می شود. با فرض آدیاباتیک بودن این فرآیند، دمای نهایی گاز داخل مخزن را بیابید.

قانون اول ترمودینامیک برای حالت گذرا:

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

$$Q_{C.V.} = 0, W_{C.V.} = 0, m_e = 0, \text{ and } (m_1)_{C.V.} = 0 \longrightarrow m_i h_i = m_2 u_2$$

$$h_i = u_2$$

با توجه به خالی بودن مخزن در ابتدا داریم:  $m_2 = m_i$  در نتیجه خواهیم داشت:

با مراجعه به جداول ترمودینامیکی برای بخار مافوق گرم داریم:

TABLE B.1.3 (continued)  
Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)
1200 kPa (187.99°C)					1400 kPa (195.07°C)			
Sat.	0.16333	2588.82	2784.82	6.5233	0.14084	2592.83	2790.00	6.4692
200	0.16930	2612.74	2815.90	6.5898	0.14302	2603.09	2803.32	6.4975
250	0.19235	2704.20	2935.01	6.8293	0.16350	2698.32	2927.22	6.7467
300	0.21382	2789.22	3045.80	7.0316	0.18228	2785.16	3040.35	6.9533
350	0.23452	2872.16	3153.59	7.2120	0.20026	2869.12	3149.49	7.1359
400	0.25480	2954.90	3260.66	7.3773	0.21780	2952.50	3257.42	7.3025
500	0.29463	3122.72	3476.28	7.6758	0.25215	3121.10	3474.11	7.6026

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

میانابایی

$$T_2 = 452^\circ\text{C}$$

# قانون دوم ترمودینامیک

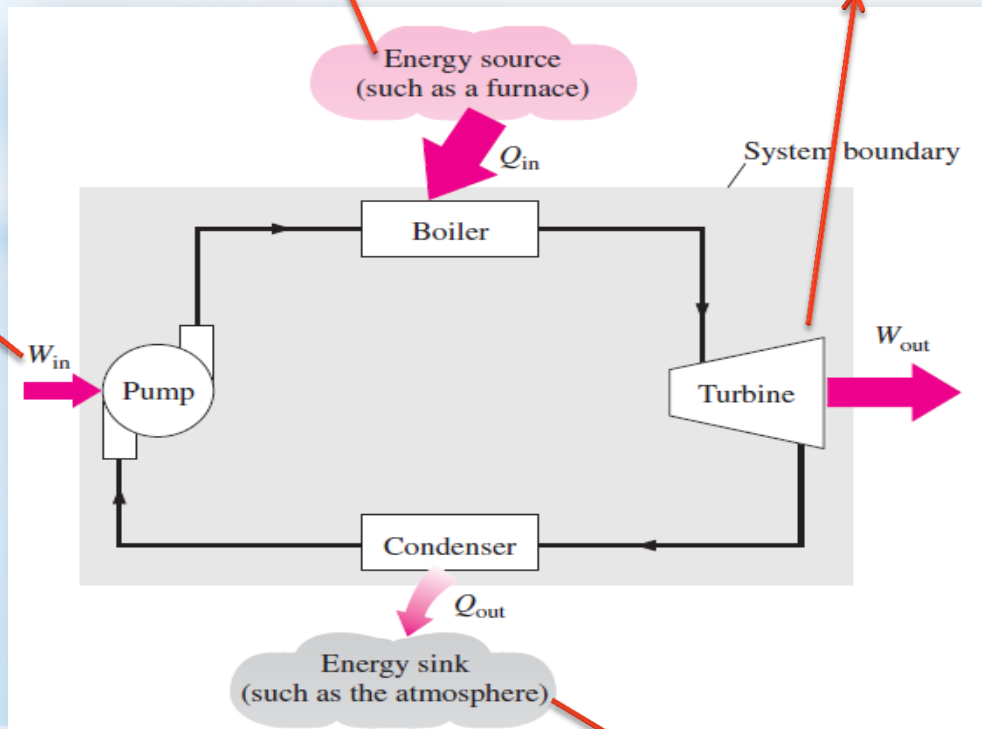
قانون دوم ترمودینامیک بیان کننده جهت و روند انجام فرآیندها می باشد. برای مثال، همیشه گرما از ماده گرم تر به سمت ماده سرد تر جریان پیدا می کند.

تعاریف:

موتور گرمایی (heat engine): یک سیستم ترمودینامیکی که در یک چرخه کار میکند و با محیط اطراف تبادل کار و گرما دارد، به صورتی که برآیند کار و گرمای آن **مثبت** باشد. این سیستم گرما را از منبع گرمایی دریافت کرده و پس از تحویل دادن کار، باقی مانده گرما را به منبع سرد تحویل می دهد.

دریافت گرما در بویلر توسط آب

انجام کار توسط بخار در توربین



$$\oint \delta w = W_{Net} = W_T - W_P > 0$$

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L$$

بازده گرمایی:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H}$$

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

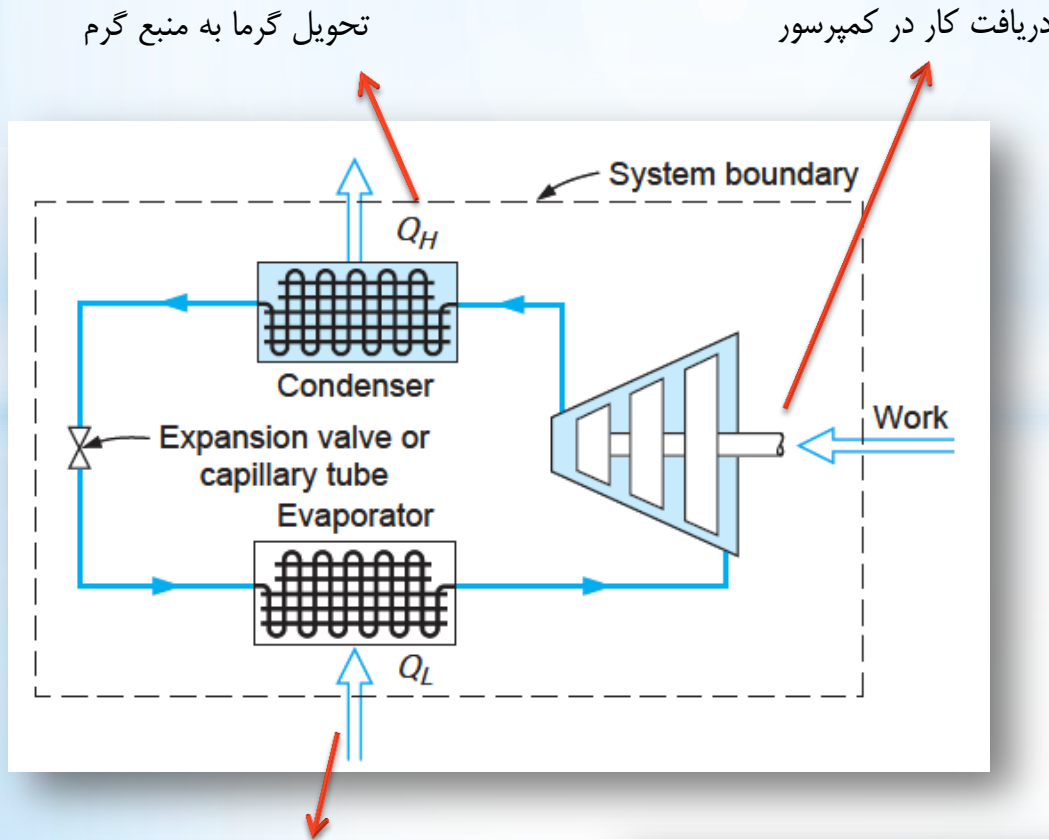
پمپ کردن آب با دریافت کار در پمپ

فرآیند تقطیر در کندانسور و گرما دادن به محیط



# قانون دوم ترمودینامیک

یخچال (refrigerator): یک سیستم ترمودینامیکی که در یک چرخه کار میکند و با محیط اطراف تبادل کار و گرما دارد، به صورتی که برآیند کار و گرمای آن **منفی** باشد. این سیستم گرما را از منبع سرد دریافت کرده و آن را به منبع گرم تحویل می دهد. این سیستم برای انجام این فرآیند نیازمند دریافت کار می باشد.



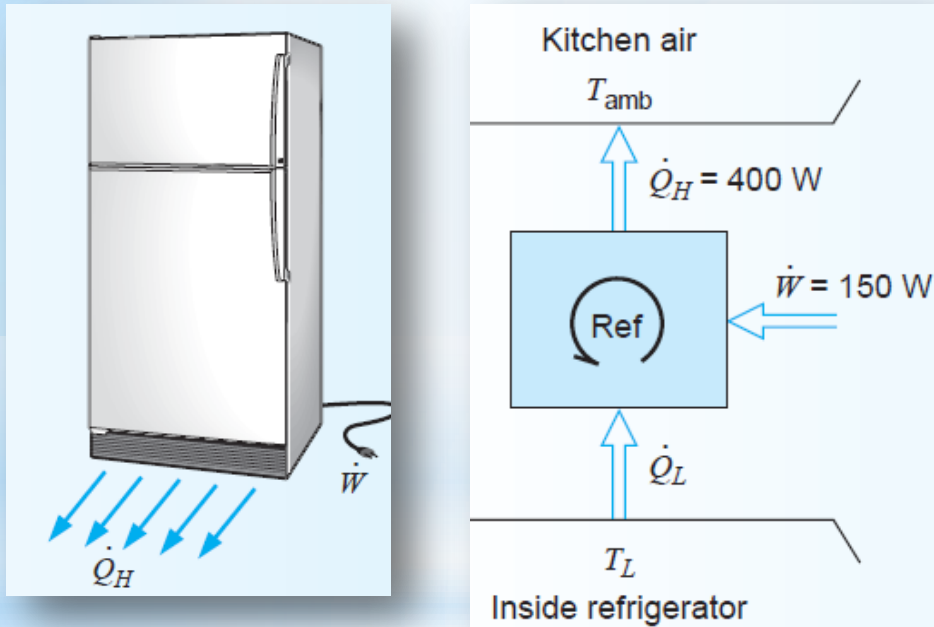
$$W_{Net} = -W_C < 0$$

$$\oint \delta Q = -Q_H + Q_L$$

ضریب عملکرد یخچال:

$$\beta = \frac{Q_L(\text{energy sought})}{W(\text{energy that costs})} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

مساله نمونه: یخچالی که در این شکل مشاهده می کنید، توانی برابر با 150 W را توسط برق دریافت می کند. در ادامه گرمایی برابر با 400 W را به هوای آشپزخانه وارد می نماید. نرخ سرد کردن مواد داخل یخچال و همچنین ضریب عملکرد آن را بیابید.



یخچال را به عنوان حجم کنترل در نظر می گیریم:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 400 - 150 = 250 \text{ W}$$

ضریب عملکرد یخچال:

$$\beta_{\text{REFRIG}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{250}{150} = 1.67$$

# قانون دوم ترمودینامیک

تعریف منبع دمایی (گرم یا سرد):

منبع دمایی (گرم یا سرد) منبعی است که گرما می تواند به صورت نامحدود از آن گرفته شود و یا به آن داده شود، بدون اینکه تغییری در درجه حرارتش ایجاد گردد. آب دریا و اتمسفر مثال هایی از منبع دمایی می باشند.

تعریف کلوین - پلانک برای قانون دوم ترمودینامیک:

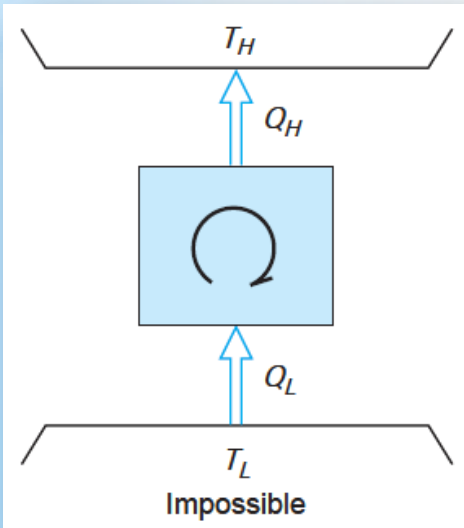
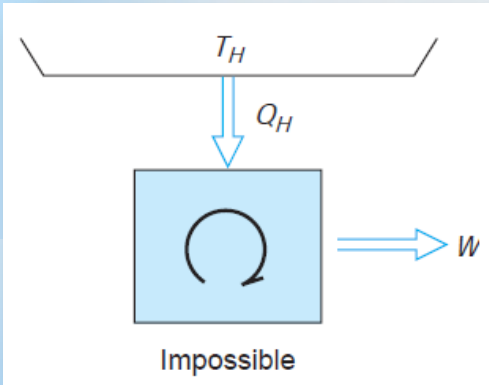
غیر ممکن است که بتوان دستگاهی ساخت که در یک چرخه کار کند و غیر از بالا بردن یک وزنه (انجام کار) و تبادل گرمایی با یک منبع دمایی (دریافت گرما)، اثر دیگری نداشته باشد.

به عبارت دیگر، چرخه مورد نظر باید حتماً ضمن تبادل گرمایی با یک منبع دیگر، مقداری از گرمایی که دریافت کرده بود را به آن تحویل دهد، و بنابراین همه گرمای دریافتی را به کار تبدیل نخواهد کرد. در نتیجه بازده چرخه نمی تواند برابر با ۱۰۰ باشد.

تعریف کلازیوس برای قانون دوم ترمودینامیک:

غیر ممکن است که بتوان دستگاهی ساخت که در یک چرخه کار کند و غیر از انتقال گرما از منبع دمایی سرد به منبع دمایی گرم، اثر دیگری نداشته باشد.

به عبارت دیگر، چرخه مورد نظر باید حتماً برای انتقال دادن گرما از منبع سرد به منبع گرم، مقداری کار دریافت نماید.



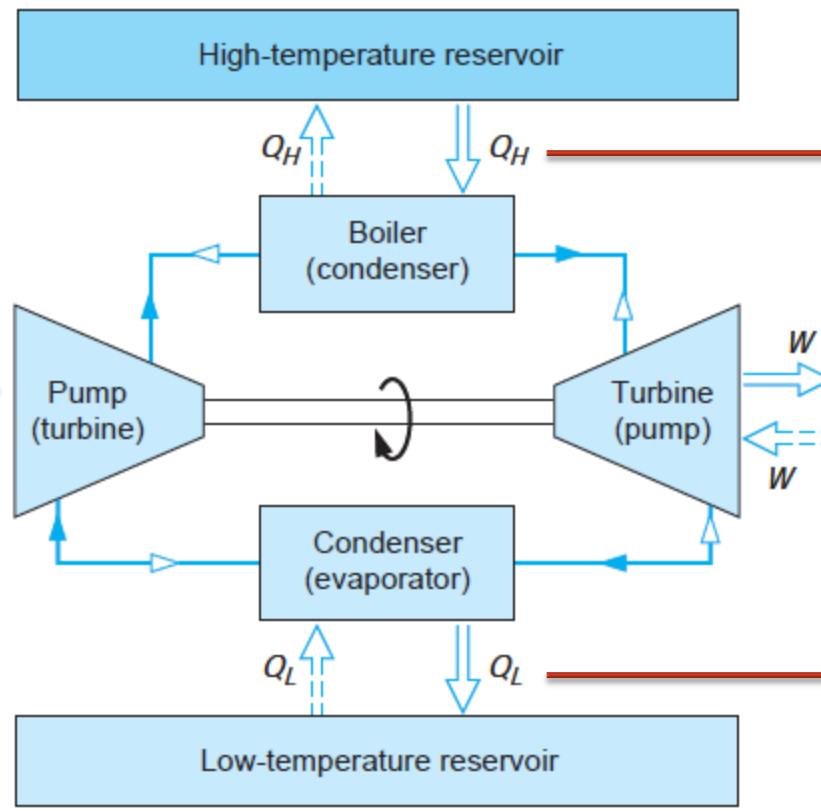
# قانون دوم ترمودینامیک

تعریف فرآیند بازگشت پذیر:

فرآیندی است که پس از انجام شدنش، بتوان آن را معکوس نمود، بدون اینکه اثری بر روی محیط و یا سیستم گذاشته شود. در غیر این صورت فرآیند را بازگشت ناپذیر می گویند.

اصطکاک، تبادل گرمایی به علت اختلاف درجه حرارت سیستم و محیط، انبساط ناگهانی و مخلوط شدن مواد با یکدیگر از عوامل بازگشت ناپذیری فرآیند ها می باشند.

نکته مهم: بالاترین بازدهی برای یک چرخه مربوط به یک موتور گرمایی که بین دو منبع دمایی گرم و سرد کار می کند، در صورتی اتفاق می افتد که تمامی فرایندها بازگشت پذیر باشند. به این چرخه، **چرخه کارنو** گفته می شود.



۱- فرایند همدمای بازگشت پذیر: دریافت گرما از منبع گرم

۲- فرایند آدیاباتیکی بازگشت پذیر

۳- فرایند همدمای بازگشت پذیر: تحویل دادن گرما به منبع سرد

۴- فرایند آدیاباتیکی بازگشت پذیر

نمودار چرخه کارنو:

بازدهی چرخ کارنو برابر است با:

$$\eta_{\text{thermal}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

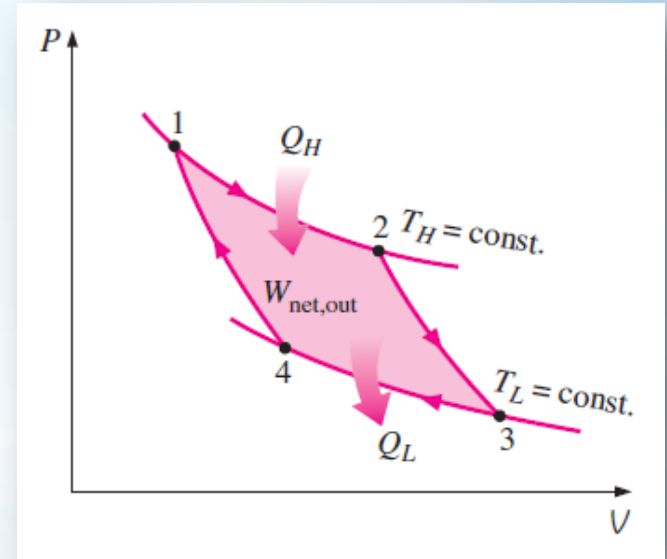
دمای منبع سرد بر حسب کلوین

دمای منبع گرم بر حسب کلوین

$$T = C + 273.15$$

کلوین

سانتی گراد



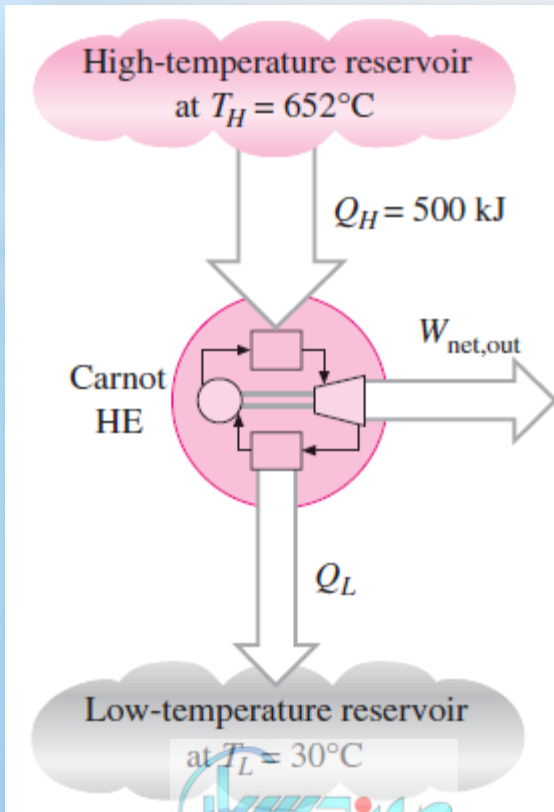
مثال: یک موتور گرمایی که طبق چرخه کارنو کار می کند، 500 kJ گرما را از منبع دمایی با درجه حرارت  $652^{\circ}\text{C}$  دریافت کرده و مقداری گرما را به منبع دمایی با درجه  $30^{\circ}\text{C}$  دفع می کند. بازدهی گرمایی این موتور و همچنین مقدار گرمای دفع شده را به دست آورید.

بازدهی گرمایی موتور کارنو:

$$\eta_{\text{th,C}} = \eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = \mathbf{0.672}$$

گرمای دفع شده:

$$Q_{L,\text{rev}} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H,\text{rev}} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = \mathbf{164 \text{ kJ}}$$



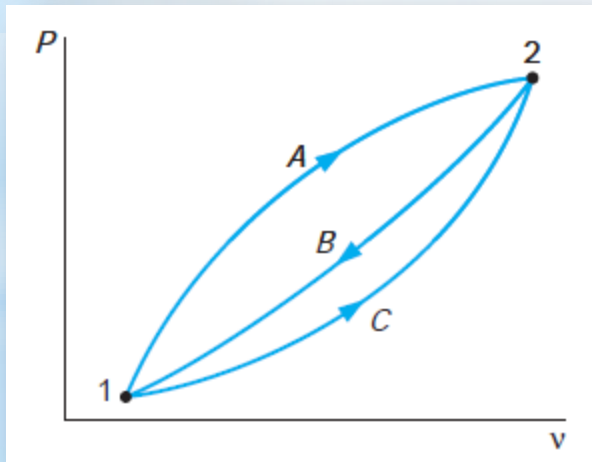
# انتروپی

در فصل قبلی، قانون دوم ترمودینامیک را برای چرخه ها بررسی نمودیم. اگر بخواهیم همین کار را برای فرآیندهایی که به صورت چرخه نیستند (مانند پر شدن یک مخزن) انجام دهیم، باید از مفهومی به نام انتروپی استفاده کنیم.

نامساوی کلازیوس:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

طبق این قانون، برای هر چرخه، رابطه زیر برقرار است: (علامت مساوی برای چرخه های بازگشت پذیر و نامساوی به چرخه های بازگشت ناپذیر مربوط می گردد).



فرض کنید یک سیستم یکبار از مسیر A و یکبار هم از مسیر C به صورت بازگشت پذیر از نقطه ۱ به نقطه ۲ برود. سپس در هر دو حالت به صورت بازگشت پذیر از مسیر B به نقطه ۱ بازگردد. با توجه به اینکه در هر دو حالت یک چرخه بازگشت پذیر را طی می کند، خواهیم داشت:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

$$\longrightarrow \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

$$dS \equiv \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

بنابراین نتیجه می گیریم این انتگرال مستقل از مسیر بوده و مقدارش برای تمام فرآیند های بازگشت پذیر یکسان می باشد. بنابراین می توانیم آن را به صورت یک خاصیت متمرکز (مستقل از مقدار سیستم) تعریف کنیم:

مقدار انتروپی مخصوص مواد در فاز های مختلف در جداول ترمودینامیک قابل دسترسی می باشد:

$$S = S_f + X S_{fg}$$

تفاضل انتروپی بخار اشباع و مایع اشباع:  $S_g - S_f$   
 کیفیت اشباع  
 انتروپی مایع اشباع  
 انتروپی مخصوص

$$\delta Q = dU + \delta W$$

قانون اول ترمودینامیک:

روابط بین خواص ترمودینامیکی:

$$\delta Q = T dS \quad \text{and} \quad \delta W = P dV$$

برای فرایندهای بازگشت پذیر داریم:  $T dS = dU + P dV$

$$H = U + PV$$

تعریف انتالپی:

$$dH = dU + P dV + V dP$$

$$T dS = dH - V dP$$

$$T ds = du + P dv$$

$$T ds = dh - v dP$$

$$ds \simeq \frac{du}{T} \simeq \frac{C}{T} dT$$

$$s_2 - s_1 \simeq C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

تغییرات انتروپی مایعات و جامدات:

## تغییرات انتروپی گاز های ایده آل:

$$T ds = du + P dv$$

$$du = C_{v0} dT \quad \text{and} \quad \frac{P}{T} = \frac{R}{v}$$

$$ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

$$\longrightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$T ds = dh - v dP$$

$$dh = C_{p0} dT \quad \text{and} \quad \frac{v}{T} = \frac{R}{P}$$

$$ds = C_{p0} \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}$$

$$\longrightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

با فرض ثابت بودن گرمای ویژه حجم ثابت و گرمای ویژه فشار ثابت داریم:

$$s_2 - s_1 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$s_2 - s_1 = C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

بنابراین در صورتی که گاز کامل یک فرایند آیزنتروپیک (انتروپی ثابت) را طی کند داریم:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

$$k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}$$



## مساله نمونه

نیترژن داخل یک سیلندر طی یک فرآیند بازگشت پذیر از فشار 100 Kpa و درجه حرارت 20 C تا فشار 500 Kpa متراکم می گردد. فرآیند به صورتی انجام می گیرد که رابطه  $PV^{1.3}$  بین فشار و حجم برقرار باشد. مقدار کار و انتقال حرارت برای هر کیلوگرم از نیترژن را بیابید.

با استفاده از رابطه کار انجام شده داریم:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n}$$

$${}_1q_2 = u_2 - u_1 + {}_1W_2 = C_{v0}(T_2 - T_1) + {}_1W_2$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{500}{100}\right)^{(1.3-1)/1.3} = 1.4498$$

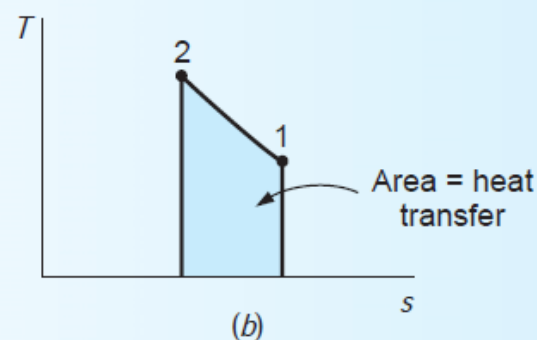
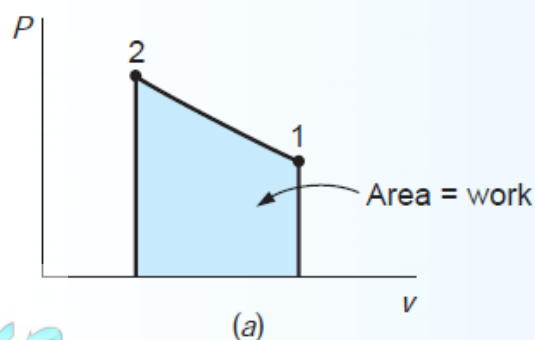
$$T_2 = 293.2 \times 1.4498 = 425 \text{ K}$$

$${}_1W_2 = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} = \frac{0.2968(425 - 293.2)}{(1 - 1.3)} = -130.4 \text{ kJ/kg}$$

قانون اول ترمودینامیک:

با توجه به بازگشت پذیر بودن فرآیند داریم:

کار انجام شده برابر است با:



## انتروپی در چرخه کارنو:

برای فرایند اول که به صورت همدمما بوده و طی آن گرما در دمای  $T_H$  دریافت می گردد داریم:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

دما ثابت

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_2}{T_H}$$

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} = 0$$

برای فرایند دوم که به صورت آدیاباتیکی می باشد داریم:

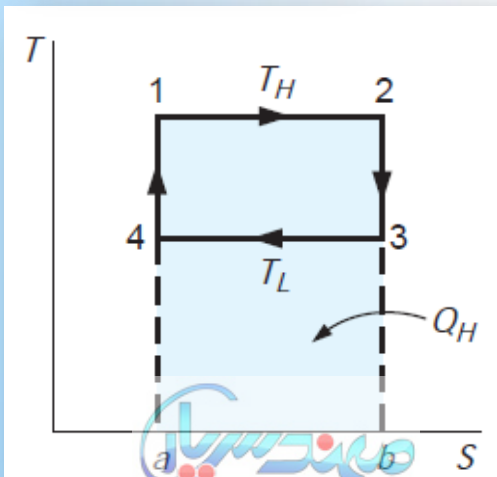
بنابراین در فرایند دوم انتروپی ثابت می ماند. به این فرایندها آیزنتروپیک می گوئیم.

$$S_4 - S_3 = \int_3^4 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} = \frac{Q_4}{T_L}$$

برای فرایند سوم که به صورت همدمما بوده و طی آن گرما در دمای  $T_L$  دفع می گردد داریم:

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} = 0$$

برای فرایند چهارم که به صورت آدیاباتیکی می باشد داریم:

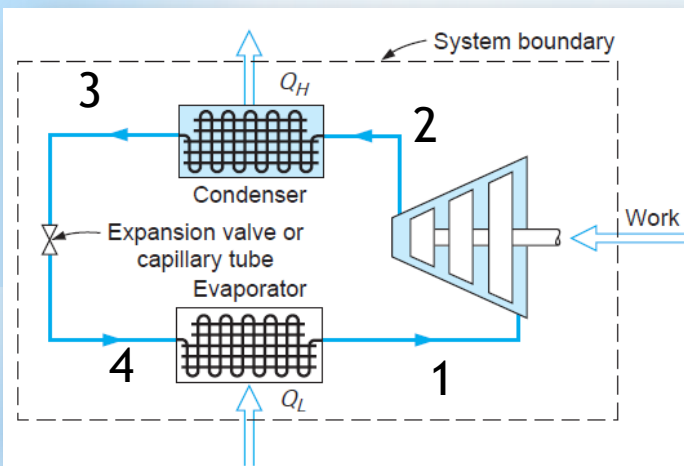


$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\text{area } 1-2-3-4-1}{\text{area } 1-2-b-a-1}$$

بازدهی گرمایی:

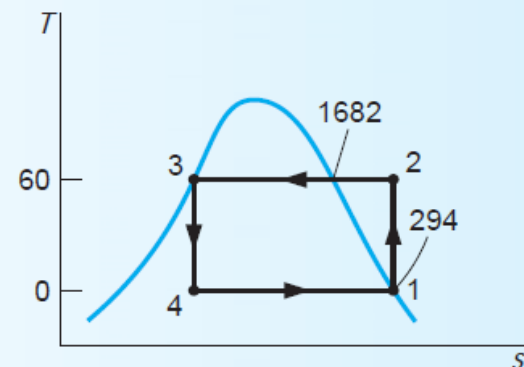
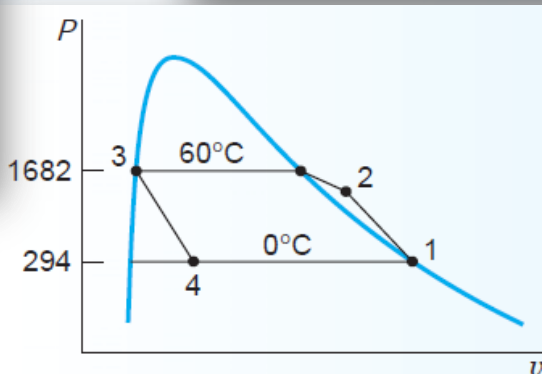
## مساله نمونه:

یک پمپ گرمایی که طبق چرخه کارنو کار می کند و سیال کاری آن R-134a می باشد را در نظر بگیرید. این سیال گرما را در دمای  $0^{\circ}\text{C}$  دریافت کرده و از حالت دو فاز (اشباع) به بخار اشباع تغییر حالت می دهد. سپس در در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  گرما را دفع کرده و به صورت مایع اشباع در می آید. فشار سیال بعد از فرایند فشرده سازی و قبل از دفع گرما را بیابید. همچنین مقدار COP پمپ گرمایی را بیابید.



**توجه:** پمپ گرمایی طبق چرخه یخچال کار می کند، اما هدف نهایی آن تولید گرما می باشد نه گرفتن آن.

$$\beta' = \frac{Q_H(\text{energy sought})}{W(\text{energy that costs})} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$



**توجه:** خواسته مساله مربوط به حالت 2 می شود. با مراجعه به جدول ترمودینامیکی برای R-134a داریم:

4 ←  $s_4 = s_3 = s_f@60\text{deg} = 1.2857 \text{ kJ/kg K}$

1 ←  $s_1 = s_2 = s_g@0\text{deg} = 1.7262 \text{ kJ/kg K}$

2 ←  $60^{\circ}\text{C}, s_2 = s_1 = s_g@0\text{deg}$

با میانبایی برای فشارهای 1600 kPa و 1400 kPa داریم:

$$P_2 = 1400 + (1600 - 1400) \frac{1.7262 - 1.736}{1.7135 - 1.736} = 1487.1 \text{ kPa}$$

ضریب عملکرد پمپ گرمایی:

$$\beta' = \frac{q_H}{w_{IN}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{333.15}{60} = 5.55$$

## تغییرات انتروپی در فرایندهای بازگشت ناپذیر:

فرض کنید در یک فرآیند بازگشت ناپذیر، گرمای  $dq$  به جرم کنترل وارد گردد. در این حالت برای تغییرات انتروپی داریم:

$$dS > \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{irr}}$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{\text{gen}}$$

انتروپی تولید شده

$$\delta S_{\text{gen}} \geq 0$$

**اصل افزایش انتروپی:**

مقدار انتروپی کل جهان، با انجام هر فرآیند بازگشت ناپذیر افزایش می یابد.

**نرخ تولید انتروپی:**

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta S_{\text{gen}}}{\delta t}$$

$$\frac{dS_{\text{c.m.}}}{dt} = \sum \frac{1}{T} \dot{Q} + \dot{S}_{\text{gen}}$$

## قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل:

در قسمت های قبلی، قانون دوم ترمودینامیک برای جرم کنترل را به دست آوردیم:

$$\frac{dS_{c.m.}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

نرخ تغییرات انتروپی  
جرم کنترل

نرخ تولید انتروپی

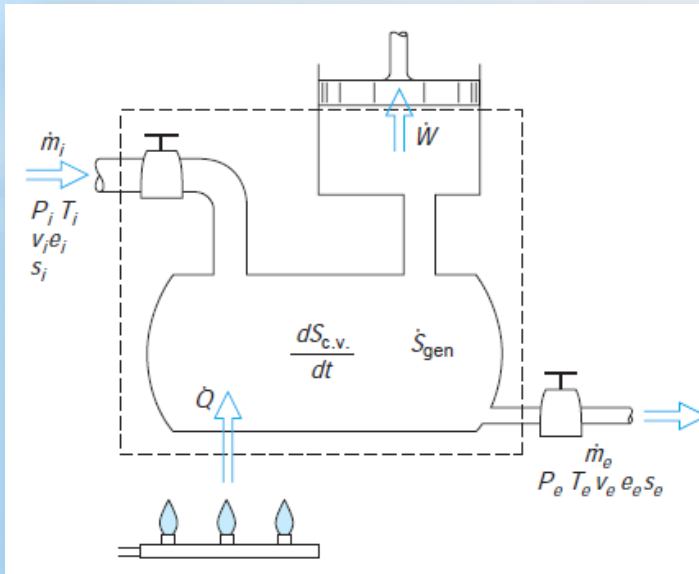
برای بیان نرخ تغییرات انتروپی حجم کنترل، از این رابطه استفاده می کنیم:

$$\frac{dS_{c.v.}}{dt} = \underbrace{\sum \dot{m}_i s_i}_{\text{جرم ورودی}} - \underbrace{\sum \dot{m}_e s_e}_{\text{جرم خروجی}} + \sum \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T} + \underbrace{\dot{S}_{gen}}_{\text{نرخ تولید انتروپی}}$$

جرم ورودی

جرم خروجی

نرخ تولید انتروپی



## قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل در حالت جریان پایدار:

در این حالت، با توجه به پایدار بودن وضعیت سیستم، نرخ تغییرات انتروپی حجم کنترل برابر با صفر خواهد بود. بنابراین:

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

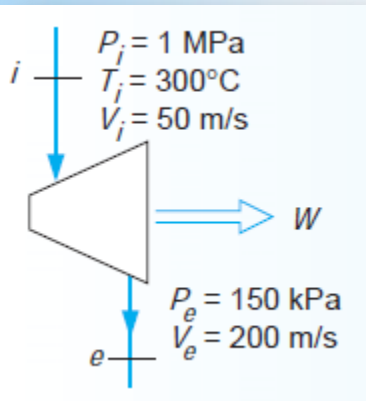
$$\sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_l s_l = \sum_{c.v.} \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

$$\dot{m}(s_e - s_l) = \sum_{c.v.} \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

$$s_e = s_l + \sum \frac{q}{T} + s_{gen}$$

بر حسب واحد جرم گذرنده از حجم کنترل:

## مساله نمونه:



بخار با فشار  $1 \text{ Mpa}$ ، درجه حرارت  $300^\circ\text{C}$  و سرعت  $50 \text{ m/s}$  به یک توربین وارد می گردد. در ادامه آن را با فشار  $150 \text{ kPa}$  و سرعت  $200 \text{ m/s}$  ترک می کند. با فرض آدیاباتیکی و بازگشت پذیر بودن فرآیند، کار انجام شده توسط هر کیلوگرم از بخار را بیابید.

با توجه به پایدار بودن جریان داریم:  $\dot{m}_e = \dot{m}_i = \dot{m}$

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

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل در حالت پایدار:

$$s_e = s_i \leftarrow s_e = s_i + \sum \frac{q}{T} + s_{\text{gen}}$$

قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل در حالت پایدار:

با مراجعه به جدول ترمودینامیک بخار مافوق گرم داریم:

$$h_i = 3051.2 \text{ kJ/kg}, \quad s_i = 7.1228 \text{ kJ/kg K}$$

بنابراین اکنون دو خاصیت مستقل از جریان خروجی را داریم. در نتیجه می توانیم هر خاصیت دیگری از آن را به دست آوریم:

$$P_e = 0.15 \text{ MPa}, \quad s_e = s_i = 7.1228 \text{ kJ/kg K}$$

$$s_e = 7.1228 = s_f + x_e s_{fg} = 1.4335 + x_e 5.7897$$

$$x_e = 0.9827 \quad \text{کیفیت جریان خروجی:}$$

$$\begin{aligned} h_e &= h_f + x_e h_{fg} = 467.1 + 0.9827(2226.5) \\ &= 2655.0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w = 3051.2 + \frac{50 \times 50}{2 \times 1000} - 2655.0 - \frac{200 \times 200}{2 \times 1000} = 377.5 \text{ kJ/kg}$$

با جایگذاری مقادیر در رابطه قانون اول داریم:

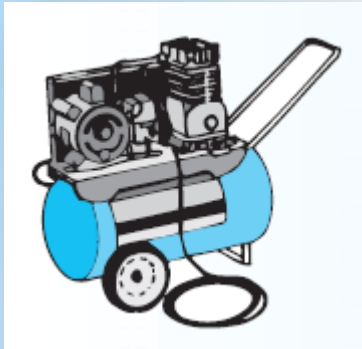
## قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل در حالت جریان گذرا:

$$\underbrace{(m_2 s_2 - m_1 s_1)}_{\text{وضعیت ابتدایی}}_{\text{c.v.}} = \underbrace{\sum m_i s_i}_{\text{وضعیت انتهایی}} - \underbrace{\sum m_e s_e}_{\text{جریان ورودی}} + \int_0^t \frac{\dot{Q}_{\text{c.v.}}}{T} dt + {}_1 S_2^{\text{gen}}$$

وضعیت انتهایی      جریان ورودی      جریان خروجی



## مساله نمونه:



فرض کنید یک مخزن با حجم  $40\text{ L}$  حاوی هوای محیط با دمای  $17^\circ\text{C}$  و فشار  $100\text{ kPa}$  می باشد. سپس یک کمپرسور که به صورت آدیاباتیک و بازگشت پذیر کار می کند هوا را تا فشار  $1000\text{ kPa}$  فشرده کرده و سپس خاموش می شود. هدف مساله پیدا کردن میزان گرم شدن هوای داخل مخزن و همین مقدار کار لازم برای این فرآیند می باشد.

$$m_2 - m_1 = m_{in} \longrightarrow \text{رابطه بین جرم ابتدایی، انتهایی و ورودی}$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = {}_1 Q_2 - {}_1 W_2 + m_{in} h_{in} \longrightarrow \text{قانون اول ترمودینامیک، حالت گذرا}$$

$$m_2 s_2 - m_1 s_1 = \int dQ/T + {}_1 S_{2gen} + m_{in} s_{in} \longrightarrow \text{قانون دوم ترمودینامیک، حالت گذرا}$$

$$\text{Adiabatic } {}_1 Q_2 = 0, \quad \text{Process ideal } {}_1 S_{2gen} = 0, \quad s_1 = s_{in}$$

$$\Rightarrow m_2 s_2 = m_1 s_1 + m_{in} s_{in} = (m_1 + m_{in}) s_1 = m_2 s_1 \Rightarrow s_2 = s_1$$

$$s_{T2}^0 = s_{T1}^0 + R \ln(P_2/P_1)$$

$$s_{T2}^0 = 6.83521 + 0.287 \ln(10) = 7.49605 \text{ kJ/kg K}$$

میانمایی از جدول  
ترمودینامیک هوا

$$T_2 = 555.7 \text{ K}, \quad u_2 = 401.49 \text{ kJ/kg}$$

$$m_1 = P_1 V_1 / RT_1 = 100 \times 0.04 / (0.287 \times 290) = 0.04806 \text{ kg}$$

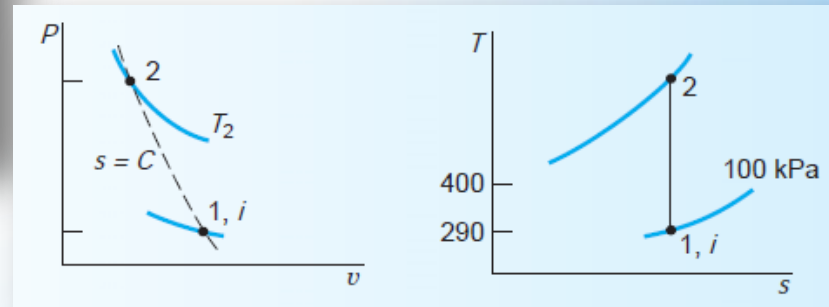
$$m_2 = P_2 V_2 / RT_2 = 1000 \times 0.04 / (0.287 \times 555.7) = 0.2508 \text{ kg}$$

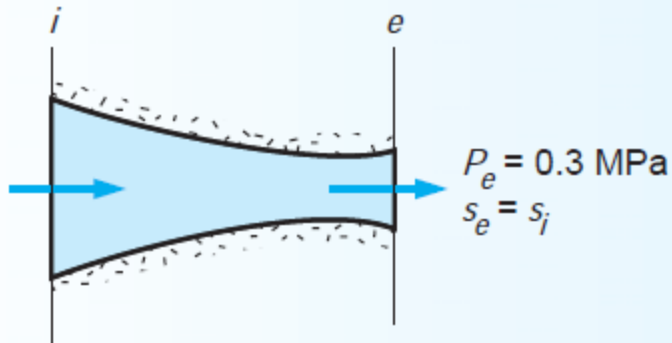
$$\Rightarrow m_{in} = 0.2027 \text{ kg}$$

$${}_1 W_2 = m_{in} h_{in} + m_1 u_1 - m_2 u_2$$

$$= m_{in}(290.43) + m_1(207.19) - m_2(401.49) = -31.9 \text{ kJ}$$

با استفاده از معادله حالت گازهای ایده آل داریم:





جریان بازگشت پذیر و آدیاباتیکی گذرنده از این نازل که با فشار 1 Mpa، دمای 300 C و سرعت 30 m/s به آن وارد می گردد را در نظر بگیرید. در صورتی که فشار جریان خارج شده از نازل شده برابر با 0.3 Mpa باشد، سرعت جریان خروجی را بیابید.

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

با توجه به پایدار بودن جریان داریم:

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

قانون اول ترمودینامیک:

$$s_e = s_i$$

قانون دوم ترمودینامیک:

$$h_i = 3051.2 \text{ kJ/kg}, \quad s_i = 7.1228 \text{ kJ/kg K}$$

با مراجعه به جدول آب در حالت مافوق گرم داریم:

$$s_e = s_i = 7.1228 \text{ kJ/kg K}, \quad P_e = 0.3 \text{ MPa}$$

بنابراین اکنون دو خاصیت از حالت نهایی را داریم:

$$T_e = 159.1^\circ\text{C}, \quad h_e = 2780.2 \text{ kJ/kg}$$

از جدول ترمودینامیک خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{V_e^2}{2} &= h_i - h_e + \frac{V_i^2}{2} \\ &= 3051.2 - 2780.2 + \frac{30 \times 30}{2 \times 1000} = 271.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$V_e = \sqrt{2000 \times 271.5} = 737 \text{ m/s}$$

