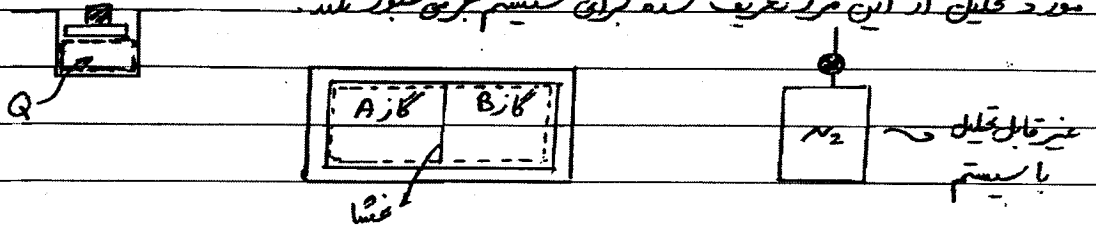
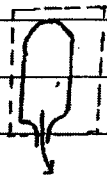


مفاهیم اولیه

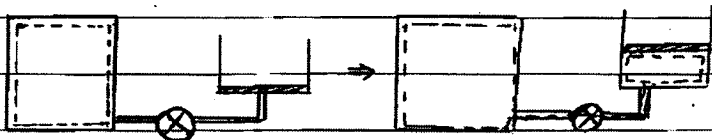
سیستم و عبارت است از حجم مشخص شده‌ای از ماده یا مرز تعریف شده که در طول فرآیند مورد تحلیل از این مرز تعریف شده برای سیستم جرم عبور نکند.



حجم کنترل یک حجم بسته در فضا که معمولاً حول یک دستگاه در نظر گرفته می‌شود و عبور جرم از مرز تعریف شده برای این حجم بلا مانع است. (تغییر شکل و حرکت این حجم کنترل بلا مانع است)



نکته: ارجحیت به روش تحلیل با سیستم است.



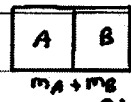
پیرامون و هر آنچه که در خارج از مرز تعریف شده برای سیستم یا حجم کنترل قرار دارد.

خاصیت ترمودینامیک و حالت ترمودینامیک:

وضعیت و مشخصه‌هایی که با آنها وضعیت مشخص می‌شود. خواص ترمودینامیک عبارتند از مشخصه‌های کلان یک سیستم مانند جرم، حجم، فشار، دما و انرژی و که بر آنها مقادیر عددی نسبت داده می‌شود و این مقادیر عددی به وضعیت فعلی سیستم مرتبط است و بهیچ وجه به گذشته آن ندارند (مشخصه‌های کلان: ماکرو و میکرو).

حالت ترمودینامیک: وضعیت ترمودینامیک یک ماده یا سیستم است که این وضعیت با خواص ترمودینامیک مشخص می‌شود.

قابل نسبت دادن به یک نقطه نیستند.



گسترده: در صورتی که جمع پذیر روی اجزای سیستم باشند  
 (extensive) جرم - حجم - انرژی

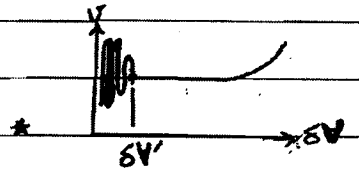
خواص ترمودینامیکی

متحرک: خواصی که جمع پذیر روی اجزای سیستم نباشد. مثل: فشار و دما  
 (intensive)  
 قابل نسبت دادن به یک نقطه است. (نمودار توزیع)

$$v = \frac{V}{m} \frac{m^3}{kg}$$

در حجم مخصوص

منبع حرارتی و حجم بسیار بزرگ که با گرفتن گوا از آن و دادن گراییه تغییر نمی کند

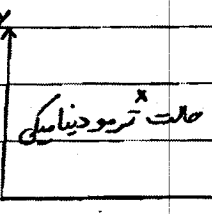
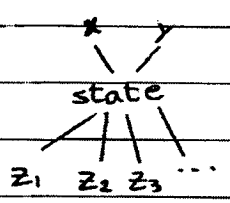


$$v = \lim_{\delta m \rightarrow 0} \frac{\delta V}{\delta m} \quad (\text{Continuos})$$

عینی که بیویکی ماده حفظ شود

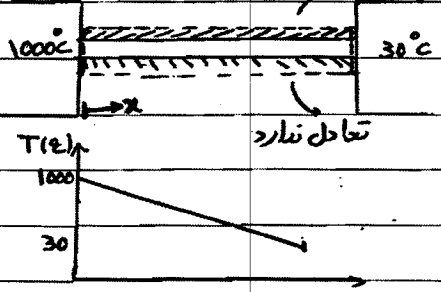
قانون فاز گیبس برای تعیین حالت ترمودینامیکی یک ماده لازم است دو خاصیت ترمودینامیکی متحرک

مستقل از هم مشخص شوند (ماده خالص)



تعادل ترمودینامیکی: در ترمودینامیکی یک سیستم هنگامی در تعادل است که اگر ایزوله شود هیچ گونه تغییری در خواص نقاط درونی آن با گذشت زمان مشاهده نشود ایزوله شدن یک سیستم به معنی آن است که ارتباطش با بیرون قطع شود به طوری که نتواند با بیرون تبادل انرژی (از طریق کار و حرارت) داشته باشد.

بایا بودن (steady state): سیستم در شرایطی است که خواصش با گذشت زمان تغییر نمی کند. (انرژی به ایزوله بودن ندارد) steady است.



از یک دیدگاه دیگر خواص ترمودینامیکی به دو دسته تقسیم می‌شوند: ① خواصی که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند ② خواصی که این گونه نیستند (انرژی درونی، آنتالپی، ...). فشار، حجم، دما، برهم‌کنش و ...

قانون صفر ترمودینامیکه  $T_A = T_B \Rightarrow T_B = T_C$    
  $T_A = T_C$    
 در دو جسم A و B در تماس و در حالت تعادل حرارتی

این تعریف از دما (practical Temperature) به دلیل اینکه همیشه ماده مرجع است، نفع دارد. در حالی که تعریف دیگری از دما (Absolute Temperature) مستقل از مبنی ماده است.

تجهیز این از قانون فاز گیبز  $Z_1 = Z_1(x, y)$

معادله حالت به معادله جبری گفته می‌شود که ارتباط بین فشار، دما و حجم مخصوص مایه (مهندسی)   
 معمولاً در مایه‌ها و جامدات

در اغلب اوقات این معادله به صورت  $P = P(V, T)$  است. در بعضی موارد  $V = V(T, P)$    
 معمولاً در گازها

معادله حالت  $P = \frac{RT}{V}$    
 گاز کامل

$[T] = K$  ،  $R = \frac{\bar{R}}{M}$  ،  $\bar{R} = 8.3143 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$    
 معمولاً در مایه‌ها و جامدات

$[R] = \frac{kJ}{kg \cdot K}$    
 گرم مولی

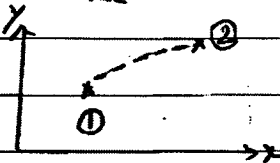
$[P] = kPa$

توجهی دست نوشتن واحدها:  $kJ / kPa$  ،  $W / kPa$  ،  $MPa / mPa$  ،  $W / kPa$    
 معمولاً در مایه‌ها و جامدات

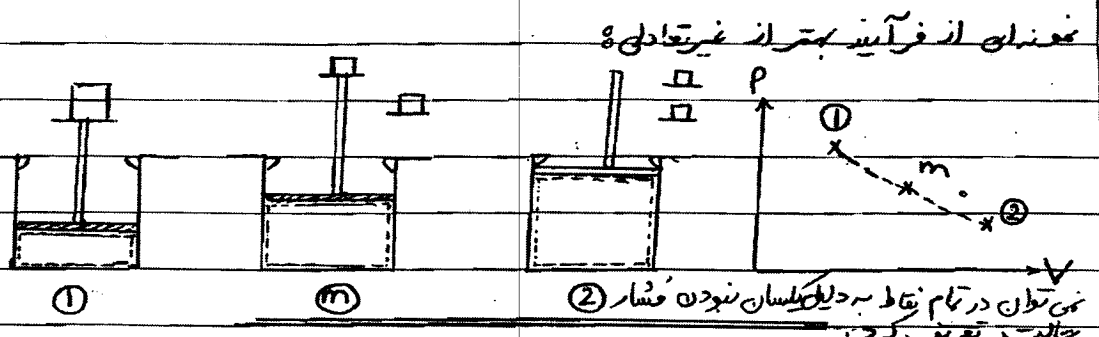
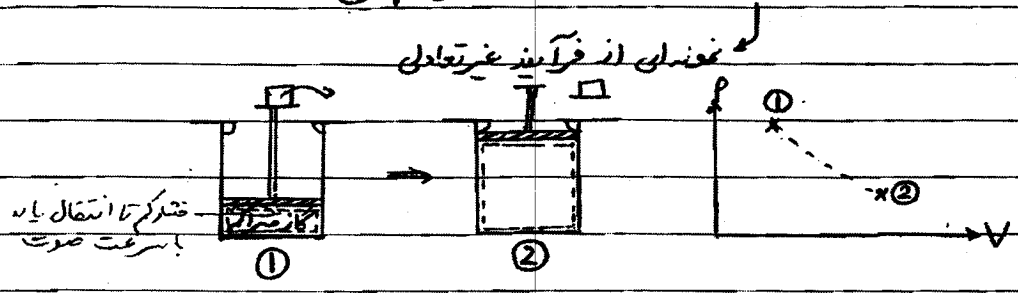
معادله حالت گاز ایده آل برای تمامی گازها صادق است مشروط بر آنکه تأثیر نیروهای بین مولکولی ناچیز باشد (و بعداً بررسی می‌شود).

معادله حالت واندر والس  $P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$    
 گازها و مایه‌ها

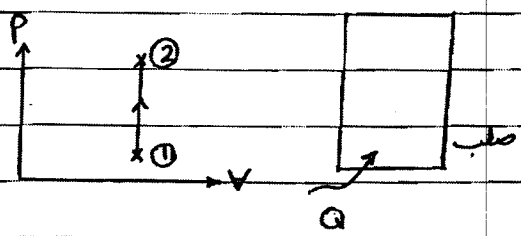
فرآیند ترمودینامیکی: هرگاه حالت غرض نمود می‌گوئیم یک فرآیند صورت گرفته است. (فرآیند می‌تواند بر اثر تبادل انرژی انجام شود).



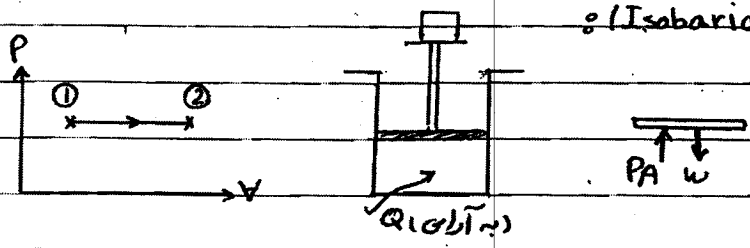
چگونه می‌توانیم فشار را تغییر دهیم در یک سیستم هم‌جای هم  
 شبه تعادلی و به فرآیندی گفته می‌شود که در حین اجرای فرآیند سیستم در هر لحظه  
 شرایط تعادلی داشته باشد. اگر اداها فشار و دگر اداها داشته باشیم  
 فرآیند ترمودینامیکی غیر تعادلی: در حین فرآیند سیستم هیچ‌گاه تعادل را تجربه نکرده است.



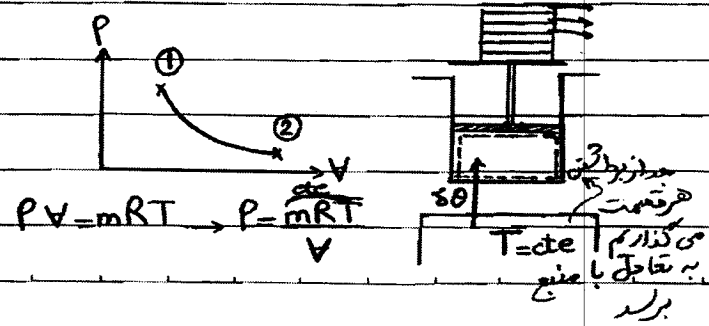
می‌توان در تمام نقاط به دلیل یکنواختی نبودن فشار  
 حالت تعریف کرد.  
 فرآیندهای شش‌گانه ترمودینامیکی  
 ۱- فرآیند حجم ثابت (Isochoric)



۲- فرآیند فشار ثابت (Isobaric)

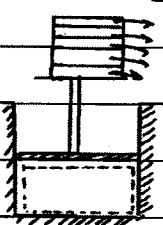


۳- فرآیند دما ثابت (Isothermal)



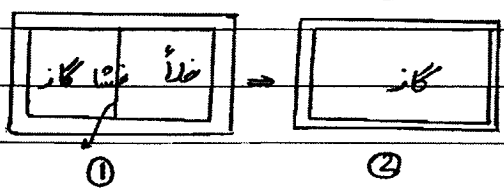
فرآیند شیب متعادلی آدیاباتیگ و تبادل حرارت با محیط اطراف ندارد.

فرآیند آدیاباتیگ هرمانیت و بالعکس.



فرآیند انبساط آزاد (فیر تعادلی)

فرآیندی که در مقابل انبساط آن هیچ مقاومتی وجود ندارد. (گاز هیچ کاری انجام نمی دهد، زیرا هیچ نیروی مقاومی وجود ندارد.)

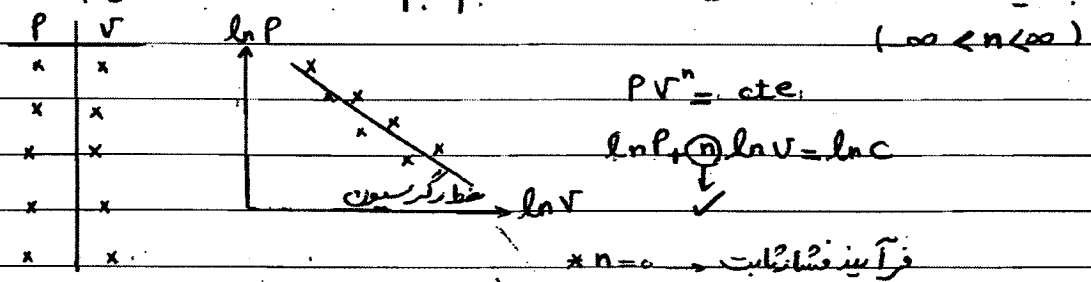


فرآیندهایی که در این قالب ها قرار نگیرد، جزء فرآیندهای پلی تریپیک فرقی می شوند.

فرآیند پلی تریپیک، فیه فرآیندهای گفته شد که در طی انجام آنها رابطه بین فشار و حجم (یا عم مخصوص) از فرمول زیر پیروی کنند. (این فرآیند یک نمونه از فرآیندهای تعادلی است.)

$$P V^n = cte = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

در این رابطه n یک ثابت آنراست که معمولاً طوری انتخاب می شود که فرمول فوق بتواند به بهترین صورتی داده های اندازه گیری شده فشار و حجم (یا عم مخصوص) را در طول فرآیند برازش نماید.



\* n = 0 → فرآیند فشار ثابت

( $P V^n = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ ) \* n = ∞ → فرآیند حجم ثابت

\* n = 1 → فرآیند همپا (گاز ایده آل)

اگر ابرکننده یک فرآیند پلی تریپیک، گاز ایده آل باشد، رابطه بین داده حجم و همپن فشار و داده ها با ی توانی بیست آورد.

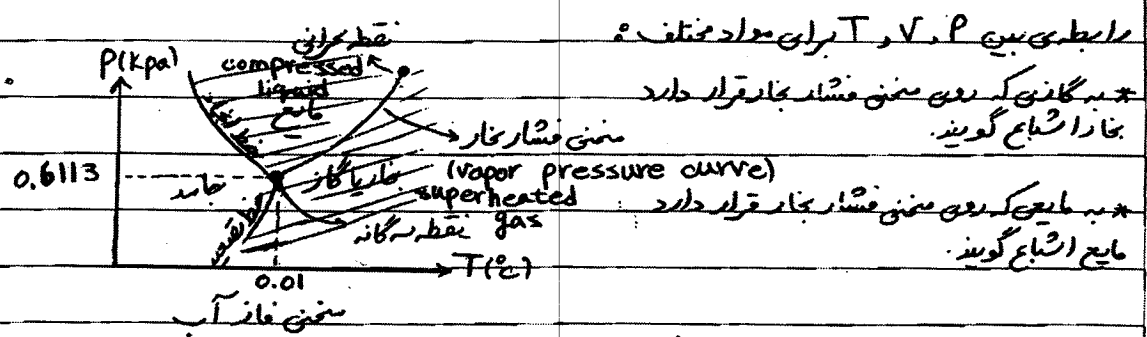
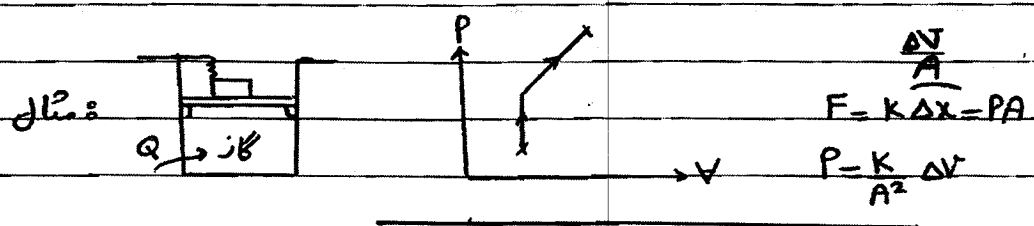
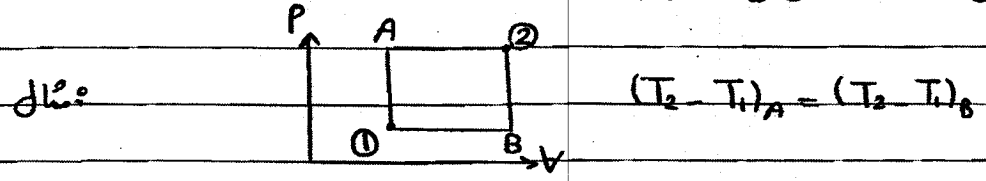
$$P V^n = cte \Rightarrow V = \frac{RT}{P} \Rightarrow P \left( \frac{RT}{P} \right)^n = const$$

لاطف:  $P V = RT$

$$\Rightarrow T^n P^{1-n} = const \rightarrow T P^{\frac{1-n}{n}} = const$$

همپن:  $T V^{1-n} = const$

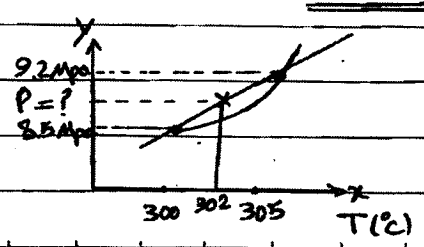
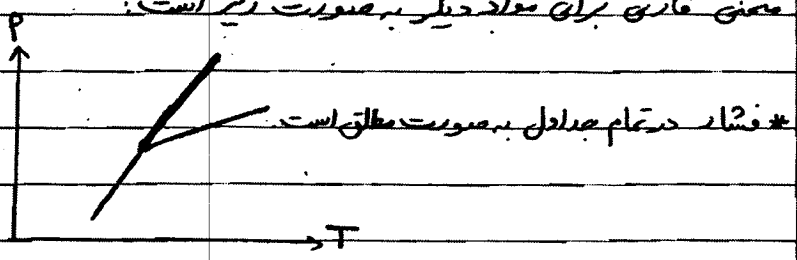
میکنیم تر و سردی میکنیم و مجموعاً آن فرآیند است که پس از انجام آن سیستم به حالت اولیه بازمیگردد.  
(فرآیندها می توانند تعادلی یا غیر تعادلی باشند)



جدول Saturation table  
vapor liquid  
vapor solid

saturated liquid v.s. Compressed liquid  
superheated vapor v.s. saturated vapor

منحنی فاز برای مواد دیگر به صورت زیر است:



برای مواد گازی و مایع می توانیم:  
$$\frac{302 - 300}{305 - 300} = \frac{P_s - 8.5}{9.2 - 8.5} \rightarrow P_s = \dots$$

در دو حالت مختلف

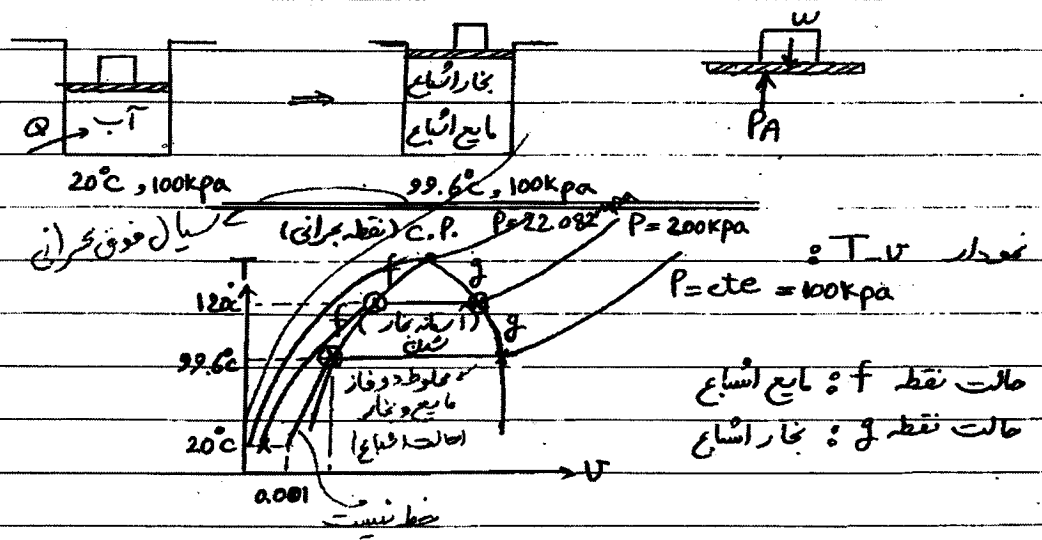
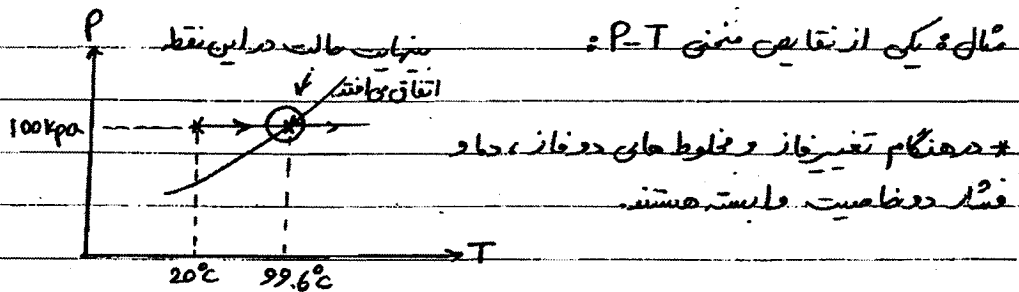
v

270°C, 280 kpa : double interpolation

T	200 kpa	T	280 kpa	T	300 kpa
250°C	1.19	250°C	x	250	0.79
300°C	1.31616	270°C	z	300	0.87529
		300°C	y		
	$\frac{280-200}{300-200} = \frac{x-1.19}{0.79-1.19}$				$\frac{280-200}{300-200} = \frac{y-1.31616}{0.87529-1.31616}$
			$\frac{270-250}{300-250} = \frac{z-x}{y-x} \rightarrow z = \checkmark$		

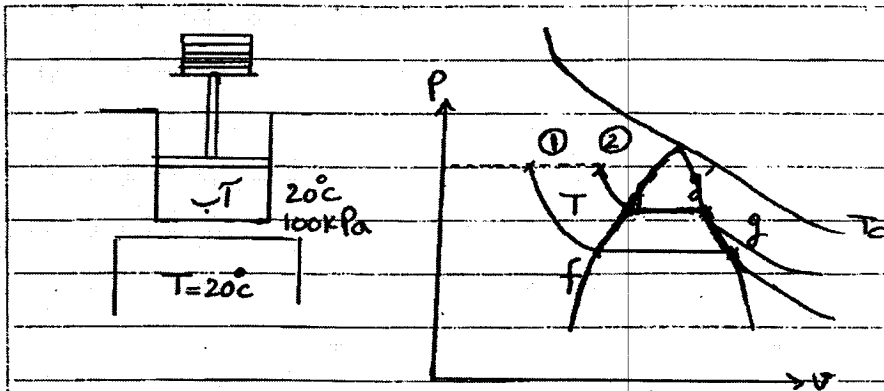
اگر بخواهیم بقیه اطلاعات یک حالت را با آن تالی و آن تروی حدس بزنیم  
موجود  $s, h$

$T = T(P, h) \Rightarrow P = P(T, s)$  مگر



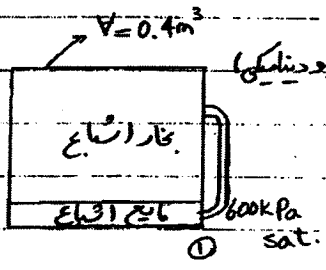
$P > P_c \Rightarrow$  supercritical fluid  $\rightarrow$  مایع با ویژگی های مایع و بخار وجود ندارد

نمودار P-v



وقتی به آستانه بخار شدن می‌رسیم و منبع را حذف کرده و تنها به سیستم حرارت می‌دهیم در همین حال دما ثابت می‌ماند پس از گذشتن از نقطه اشباع همان صورت قبلی ادامه می‌دهیم  
 $P > P_c \Rightarrow$  بیابان فوق بحرانی

مثالی یک ظرف صلب به حجم  $0.4 \text{ m}^3$  حاوی آب اشباع در فشار  $600 \text{ kPa}$  می‌باشد. در صورتی که آب مایع و بخار آب به ترتیب 10% و 90% است. کیفیت را محاسب کنید.



نکته:  $x = \frac{m_g}{m}$  کیفیت اشباع  $\rightarrow$  کیفیت اشباع  $\rightarrow$  کیفیت اشباع  $\rightarrow$  کیفیت اشباع  $\rightarrow$  کیفیت اشباع  $\rightarrow$  کیفیت اشباع

$$V = V_f + V_g \rightarrow mV = m_f v_f + m_g v_g$$

$$\rightarrow V = (1-x)v_f + x v_g$$

$$\Rightarrow V = v_f + x(v_g - v_f) \Rightarrow \boxed{V = v_f + x v_{fg}}$$

$(T, x) \rightarrow V$

حل:

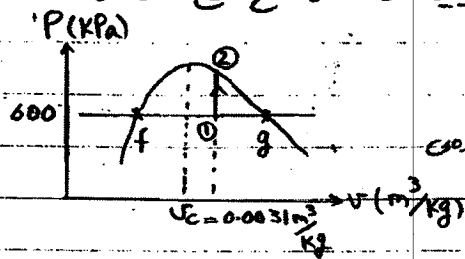
$$m = m_f + m_g \Rightarrow \frac{V}{v} = x \frac{v_g}{v_g} + \frac{V - x v_g}{v_f} \rightarrow V = \left[ \frac{0.9}{v_g} + \frac{0.1}{v_f} \right]^{-1} = 0.01067 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_f = v_f |_{600 \text{ kPa}} = 0.001101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad / \quad v_g = v_g |_{600 \text{ kPa}} = 0.3157 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

نکته:  $x$  فقط در ناحیه اشباع تعریف شده است.

$$x = \frac{V - v_f}{v_{fg}} = 0.0303$$

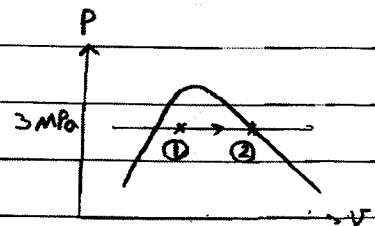
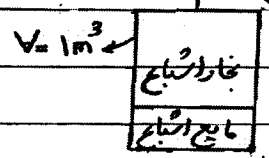
بدون توجه به آماهی مرارت داده می‌شود. تعیین کنید که آیا سطح مایع داخل مخزن بالای ورودی یا پایین ورودی است؟



بین سطح آب پایین می‌آید.  $(v_c > v)$   
 نکته: آخرین نقطه در جدول اشباع نشان دهنده خواص نقطه بحرانی است.



مثال ۹: مخلوط مایع و بخار آب در فشار 3 MPa در داخل ظرف صلبی موجود می باشد در بالای ظرف شیر وجود دارد که فشار داخل ظرف را ثابت نگه دارد محتویات داخل ظرف در حالت دیلیت می کنند تا داخل ظرف صافاً بخار دار شده باقیمانده حجم خارج شده از داخل ظرف را محاسب کنید؟ کیفیت اولیه 30٪ است.

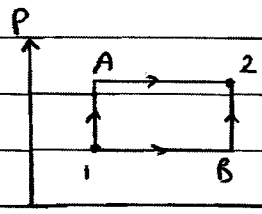


$$m_1 = \frac{V}{v_f} \cdot v_f = (v_{fg} + x v_{fg})_{3MPa}$$

$$m_2 = \frac{V}{v_g} = v_{g, 3MPa}$$

$m_1 - m_2 =$  جرم خارج شده

مثال ۱۰: هر انتگرالی را که بتوان به صورت یک دیفرانسیل کامل نوشت، مستقل از مسیر است.



$$\textcircled{1} \int_1^2 2PT dP + \int_1^2 P^2 dT = \int_1^2 (2PT dP + P^2 dT)$$

$$= \int_1^2 d(P^2 T) = (P^2 T)_2 - (P^2 T)_1$$

$$\textcircled{2} \int_1^2 P dV + \int_1^2 V dP = \int_1^2 d(PV) = (PV)_2 - (PV)_1$$

اما انتگرال  $\int_1^2 P dT$  از مسیر A بیشتر است.

معادله های عمومی

معادله عمومی تراکم پذیری:

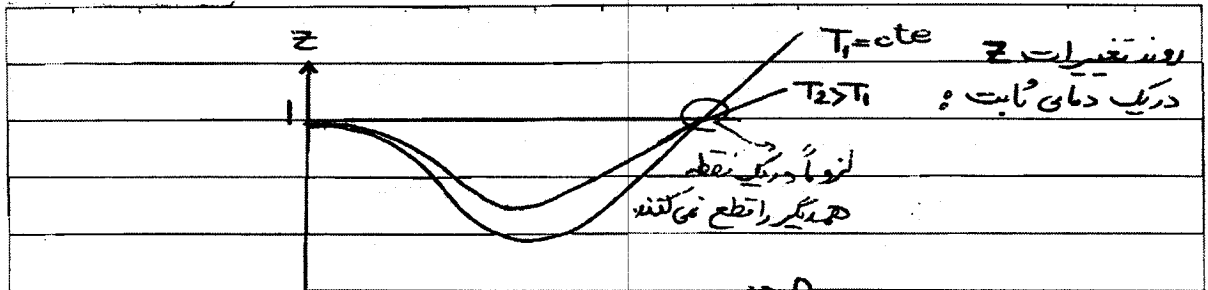
اگر داده فشار نقطه بحرانی و یا جرم مولکولی و یا فومول مولکولی داده شود در نظر در دست باشد می توان از این جدول استفاده کرد.

$$PV = RT \rightarrow P\bar{V} = \bar{R}T \quad [\bar{V}] = \frac{m^3}{kmol}, \quad \bar{R} = 8.3143 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{P\bar{V}}{RT} = \bar{Z}$$

$\bar{Z}$  تابعی از هر دو دما و فشار است. خاصیت ترمودینامیکی (ضریب تراکم پذیری) مستقل ترمودینامیکی است.

$$\bar{Z} = \bar{Z}(T, P)$$



گاز واقعی  $\bar{v} = \frac{ZRT}{P}$       گاز ایده آل  $\bar{v} = \frac{RT}{P}$

\* هر چه در فشار ثابت، دما بیشتر شود رفتار گاز به رفتار گاز ایده آل نزدیک تر شود (حجم بیشتر و در نتیجه تأثیر مولکول ها بر هم کمتر شود)

\* با تقسیم فشار به فشار بحرانی و همپنین دما، نمودار تراکم پذیری عمومی بدست می آید که برای تمام گازها صادق است

$P_r = \frac{P}{P_c}$        $T_r = \frac{T(K)}{T_c(K)}$

water  $\rightarrow 20 \text{ MPa}, 400^\circ\text{C}$        $\bar{v} = 0.00994 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

از فشار از نمودار  $P_c = 22.12 \text{ MPa}, T_c = 647.3 \text{ K}$

تراکم پذیری  $P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{20}{22.12} = 0.904$  /  $T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{673.15}{647.3} = 1.039$

$Z \approx 0.65$        $\bar{v} = Z \frac{RT}{P} = 0.65 \times \frac{8.3143}{18} \times \frac{673.15}{20000} = 0.0101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

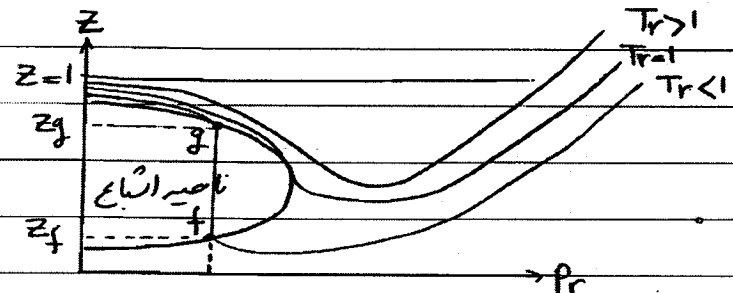
خطای نسبی  $100 \times \left| \frac{0.00994 - 0.0101}{0.00994} \right| = 1.6\%$

نکته: اگر بخواهیم با استفاده از نمودار تراکم پذیری، تعیین خواص را بدست آوریم:

$Z(T, P)$	$(T, \bar{v})$	$P_r?$
تعریف ① $P = Z \frac{RT}{\bar{v}}$	$\bar{v}$	$n$   $Z = Z(P_r, T_r)$   $P$ ①
$Z$	$\downarrow$	0   Guess   ✓
$\bar{v} = \bar{v}(T, P)$		1

11

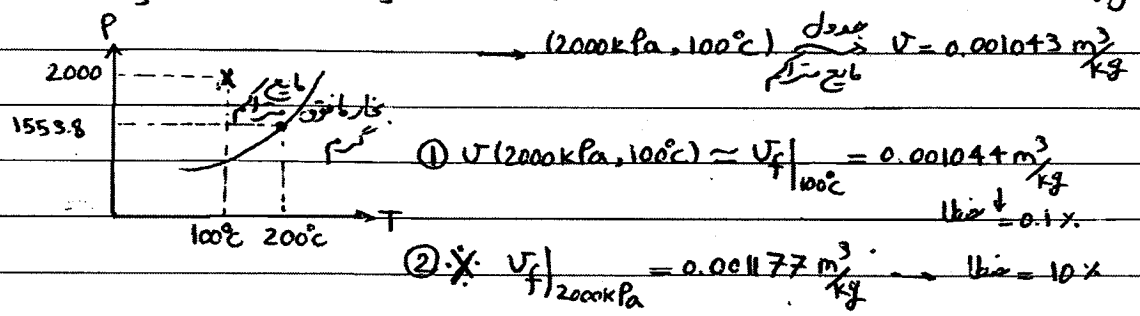
$\tilde{v}, T = 500^\circ\text{C}, v = 0.02293 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \rightarrow (P)$  تعیین:  $\rho$  با استفاده از نمودار



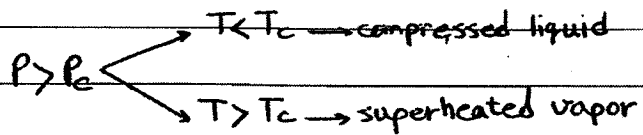
\* نمودار تراکم پذیری عمومی برای موادی استفاده می شود که منحنی آنها در دست نیافتد.

نکته: در حالتی که خواص مایع متراکم مشخص نباشند، آنها را با مایع اشباع هم درجه میزنیم.

$T_s = 200^\circ\text{C}$      $P_s = 1553.8 \text{ kPa}$  مثال:



\* برای خواص مایعات تابع از حالت و تابع ضریب انقباض است.



مثال 2

## کار و حرارت

### فصل چهارم

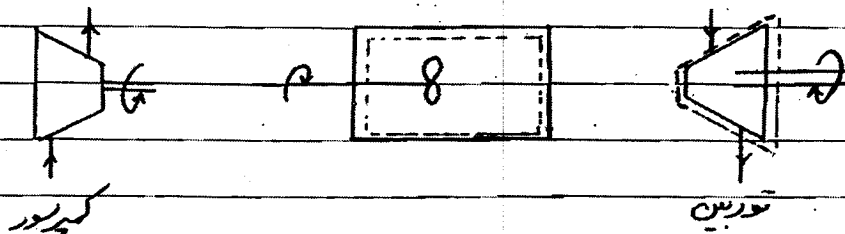
انرژی خاصیتی از سیستم که قابلیت انجام کار و انتقال حرارت دارد

\* انتقال حرارت به یک نوع مکانیزم برای انتقال انرژی به سیستم یا دریافت انرژی از سیستم که این مکانیزم صرفاً ناشی از اختلاف دما بین سیستم و پیرامون می باشد.  
انواع انتقال حرارت: ① تابش ② هرفت ③ رسانش

\* کار: یک نوع سازگار برای انتقال انرژی به سیستم یا دریافت انرژی از سیستم است. این نوع انتقال انرژی ناشی از اختلاف دما نیست. مکانیزم احیت مکانیکی دارد و می توان آن را با صعود یک وزنه (نزول) معادل سازی کرد.

I کار انبساطی (تراکی) این کار ناشی از جابجایی درون سیستم و مقابله با یک نیروی مقاوم است.

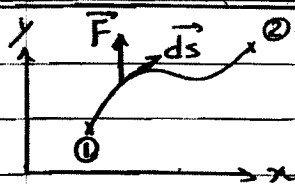
II کار محوری: کاری که توسط یک پرودانه به سیستم منتقل می شود یا از آن گرفته می شود.



III کار جریان: کاری که انجام می شود برای به حرکت درآوردن سیال

IV کار الکتریکی: به سادگی قابل تبدیل است به صعود یک وزنه.

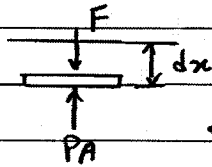
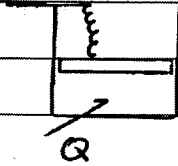
$$W_2 = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s}$$



نکته

کار انبساطی

اگر فرآیند متعادلی باشد



$$F = PA$$

$$\delta W = PA dx = P dV$$

$$W_2 = \int_1^2 P dV$$

برای فرآیند متعادلی

\* یعنی پس نیاز استفاده از تعریف کار داریم روشن، این است که فشار در تمام نقاط برابر باشد. این عبارت فرآیند متعادلی باشد

فرآیند ایزو ترمپ →  $W_2 = 0$

فرآیند فشار ثابت →  $W_2 = P(V_2 - V_1) = P_2 V_2 - P_1 V_1$  ( $P_1 = P_2 = P$ )

فرآیند ایزو ترمپ →  $W_2 = \int_1^2 P dV$       $P = \frac{mRT}{V}$  /  $P = \frac{RT}{v-a}$       $\frac{a}{v^2}$

\* گاز ایده آل →  $W_2 = m \int_1^2 P dv = mRT \int_1^2 \frac{dv}{v} = mRT \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$= \frac{(P_1 V_1)}{P_2 V_2} \ln \frac{v_2}{v_1} \frac{P_1}{P_2}$$

\* گاز دانه دانه →  $W_2 = m \int_1^2 \left[ \frac{RT}{v-b} + \frac{a}{v^2} \right] dv$

فرآیند ایزو ترمپ →  $W_2 = \int_1^2 P dV = m \int_1^2 P dv = m \int_1^2 \frac{c}{v^n} dv$

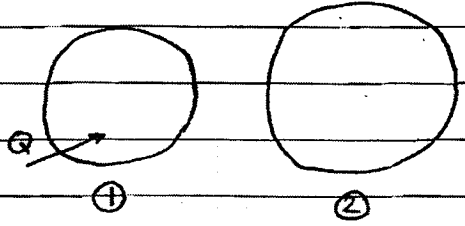
$$\rightarrow W_2 = mc \left[ \frac{v^{1-n}}{1-n} \right]_1^2 = \frac{mc}{1-n} [v_2^{1-n} - v_1^{1-n}]$$

از طرفی:  $Pv^n = \text{const} = c \rightarrow c = P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$

$$\Rightarrow W_2 = m \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} \quad (n \neq 1)$$

$$W_2 = m P v \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \quad n=1$$

مثال 2: در داخل یک بالن کروی شکل به قطر 1m، هوا در دمای 20°C و فشار 150 kPa موجود می باشد. به بالن حرارت می دهیم تا حجم بالن 10٪ افزایش می یابد. جنس بالن از اجزای است که خاصیت مکانیکی آن و فشار در داخل بالن با قطر آن رابطه مستقیم دارد. مطلوب است محاسبه کار انجام شده توسط هوا در داخل بالن و تغییر دمای بالن.



$$P \propto D \Rightarrow P \propto V^{\frac{1}{3}} \Rightarrow PV^{-\frac{1}{3}} = \text{const}$$

$$W_2 = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

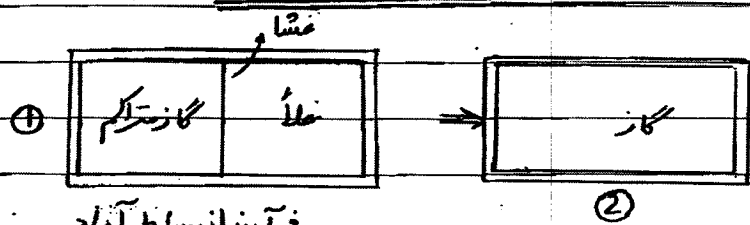
$$V_2 = 1.1 V_1$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow P_2 = (1.1)^{\frac{1}{3}} P_1$$

$$W_2 = \frac{[(1.1)^{\frac{1}{3}} \times 150 \times 10^3] \left[1.1 \times \frac{4}{3} \times 0.5^3\right] - 150 \times 10^3 \times \frac{4}{3} \times 0.5^3}{1 - (-\frac{1}{3})} = 7.982 \text{ kJ}$$

داده مطلوب

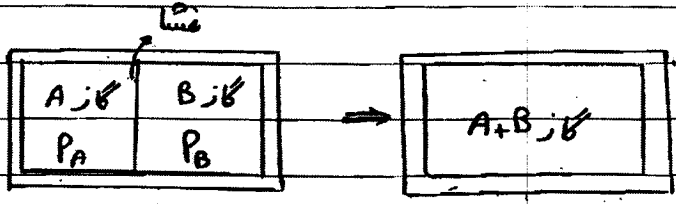
$$TV^{-n} = \text{const} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\frac{4}{3}} \Rightarrow T_2 = 14.988$$



کار در فرآیندهای غیر تعادلی

مثال 1:

چون هیچ اثری به بیرون منتقل نشده و پس می توان آن را با صعود یک فنز معادل سازی کرد. ولتا کار صفر است (W=0)

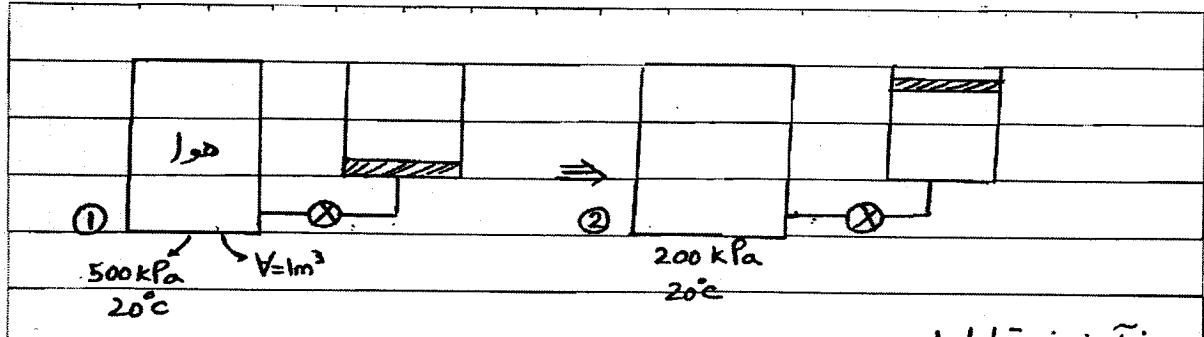


(W=0)

مثال 2:

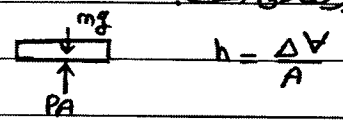
مثال 3: هوا در فشار 500 kPa و دمای 20°C در داخل فنز به حجم 1m<sup>3</sup> موجود می باشد. فنز از طریق شیر بسته ای به ریلیند بیستون بدون اصطکاک متصل است که بیستون در وضعیت اولیه در کف ریلیند قرار دارد. برای بالا بردن بیستون فشار 200 kPa مورد نیاز است. شیر را باز می کنیم و اجازه می دهیم که هوا ولتا ریلیند شود. در نهایت هوا در دمای 20°C به تعادل می رسد. کار انجام شده توسط هوا در طول این فرآیند را محاسبه کنید.

۱۵



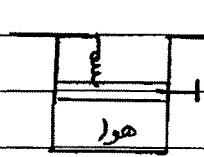
\* فرآیند غیر تعادلی است.

external work:  $w_2 = mgh$



$$w_2 = P_2 \Delta V = P_2 V_1 \left( \frac{V_2}{V_1} - 1 \right) = 200 \times 1 \left( \frac{500}{200} - 1 \right) = 300 \text{ kJ}$$

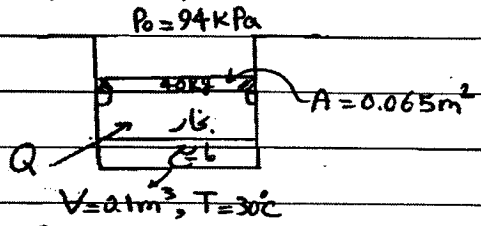
با فرض گاز ایده آل  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}$



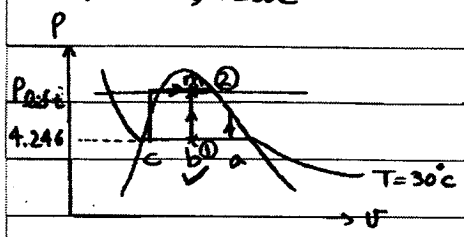
مسئله ۴ با برداشتن پین نگاز به سرعت نسبت به خود دراز می‌شود  
لذا یک فرآیند غیر تعادلی است.

مسائل:

مسئله ۱: ۱ kg مخلوط مایع و بخار آب مطابق شکل در داخل محفظه پمپ و بیستون موجود می‌باشد. انتقال حرارت صورت می‌گیرد تا جایی که زیر بیستون فقط بخار از مایع جدا می‌شود. کار انجام شده در این فرآیند را محاسب کنید.



$$P_s)_{T=30^\circ\text{C}} = 4.246 \text{ kPa}$$



$$P_{\text{lift}} A = m_p g + P_0 A \rightarrow P_{\text{lift}} = P_0 + \frac{m_p g}{A}$$

$$P_{\text{lift}} = 94 + \frac{40(9.81) \times 10^{-3}}{0.065} = 100 \text{ kPa}$$

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0.1}{1} = 0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

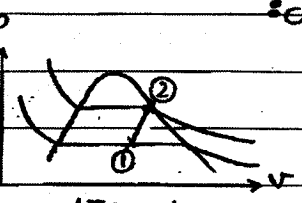
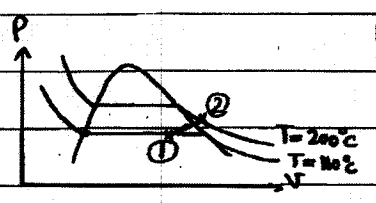
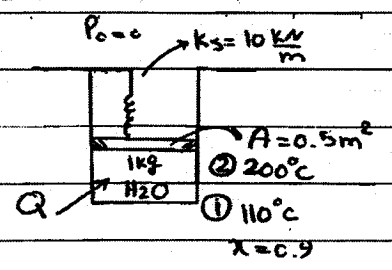
$$v_2)_{P_{\text{lift}}} = 1.624 \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_2)_{P_{\text{atm}}} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$v_2)_{P_{\text{atm}}} < v_1 < v_2)_{P_{\text{lift}}}$  → مسیر a-b-c-d

$$w_2 = w_{1-2} + w_{2-3} = m P_2 (v_2 - v_1) = m P_{\text{lift}} [(v_2)_{P_{\text{lift}}} - v_1] = 152.4 \text{ kJ}$$

کار

مثال 2: کار را در این فرآیند حساب کنید



حالت (I)

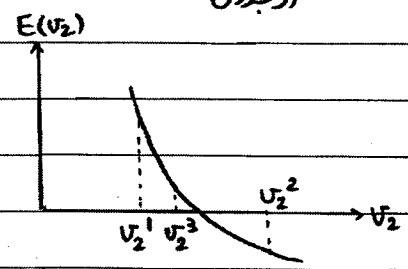
حالت (II)

این فرآیند یک پروسه شبه متعادلی است. در انتهای نیروی از طرف فنربا بستون وارد می شود

$$PA = W + k_s \Delta x \rightarrow PA = P_1 A + \frac{k_s \Delta V}{A} \rightarrow P = P_1 + \frac{k_s m}{A^2} (v - v_1)$$

$$v_2 = ? \rightarrow \begin{cases} P_2 = P_1 + \frac{k_s m}{A^2} (v_2 - v_1) \\ P_2 = P(v_2, T_2) \end{cases} \rightarrow P(v_2, 200^\circ\text{C}) = P_1 + \frac{k_s m}{A^2} (v_2 - v_1)$$

$$\Rightarrow E(v_2) = \underbrace{P(v_2, 200^\circ\text{C}) - P_1}_{\text{از جدول}} - \frac{k_s m}{A^2} (v_2 - v_1)$$



بطل عددی داریم:

$$\begin{aligned} v_2^1 \text{ من } &\rightarrow E(v_2) > 0 \\ v_2^2 \text{ من } &\rightarrow E(v_2) < 0 \\ &\rightarrow v_2^3 = \frac{v_2^1 + v_2^2}{2} \\ &\Rightarrow P_2 = 160.35 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$w_2 = m \int_1^2 P dv = m \int_{v_1}^{v_2} \left( P_1 + \frac{k_s m}{A^2} (v - v_1) \right) dv = 1 \int_{1.089233}^{1.5133} \left( 193.3 + \frac{10 \times 1}{0.5^2} (v - 1.089233) \right) dv$$

$$= \int_{1.089233}^{1.5133} (99.73 + 40v) dv = 64.365 \text{ kJ}$$

P	$v_2$	$E(v_2)$
200	1.08034	+
100	2.17226	-
150	1.6263	-
175	1.35332	+
162.5	1.48981	+
156.25	1.5581	-
159.38	1.5237	-
160.935	1.5069	+
160.158	1.5154	-
160.542	1.5112	+
160.35	1.5133	+

$$\Rightarrow w_2 = 64.365 \text{ kJ}$$

جواب ←



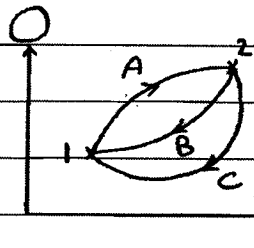
قانون اول ترمودینامیک

فصل پنجم

(I)  $\sum \dot{W}_i = \sum \dot{Q}_i$     (II)  $\dot{W}_{net} = \dot{Q}_{net}$     (III)  $\oint \delta W = \oint \delta Q$

روابط نوشته شده در بالا بیان قانون اول ترمودینامیک برای یک سیکل هستند.

ما شغلی که قانون اول ترمودینامیک را نقض نکند - PMM 1  
Perpetual motion machine of the 1st kind

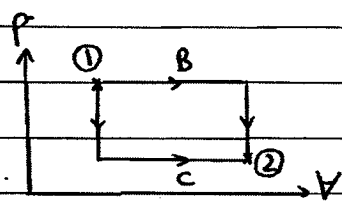


قانون اول ترمودینامیک برای یک فرآیند  
\* A و B و C فرآیندهای کاملاً دلخواه هستند (هیچ نوعی وجود ندارد که این فرآیندها نسبتاً متعادلی باشند)

AB سیکل:  $\oint \delta Q = \oint \delta W$   
 $\rightarrow (Q_2)_A + (Q_1)_B = (W_2)_A + (W_1)_B$   
 AC سیکل:  $\oint \delta Q = \oint \delta W$   
 $\rightarrow (Q_2)_A + (Q_1)_C = (W_2)_A + (W_1)_C$

از تفاضل روابط  $(Q_1)_B - (Q_1)_C = (W_1)_B - (W_1)_C \Rightarrow (Q_1)_B - (W_1)_B = (Q_1)_C - (W_1)_C$

\* مقدار حرارت را و تبدیل شده و همچنین کار انجام شده به مسیر فرآیند بستگی دارد. اما اختلاف Q و W به نوع فرآیند بستگی ندارد.



$(W_2)_B > (W_2)_C$

$\Delta E = (Q_2)_A - (W_2)_A$

E: Energy of the system (kJ) - خاصیت ترمودینامیکی

$E = \frac{1}{2} m V^2 + mgz + U$  - (kJ) - خاصیت ترمودینامیکی - انرژی درونی

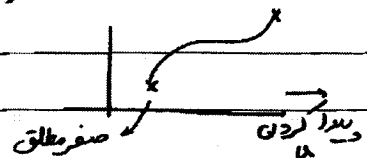
انرژی درونی (انرژی در ساختارهای ریز)

\* مقدار انرژی درونی به حالت ترمودینامیکی بستگی دارد

$u = \frac{U}{m}$  (kJ/kg)

قانون اول برای یک سیستم  $Q_2 - W_2 = E_2 - E_1$   
 $(E = \frac{1}{2} m V^2 + mgz + U)$

با فرض نظر کردن از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل  $Q_2 - W_2 = U_2 - U_1$



\* انرژی درونی در صفر مطلق برابر صفر است

مال و مخلوط مایع و بخار آب با کیفیت 80% در دمای 20°C در داخل ظرف طوی موجود می باشد به علاوه حرارت می دهیم تا در داخل ظرف مایع یا بخار اشباع داشته باشیم. حرارت منتقل شده به آب داخل ظرف را در طول این فرآیند محاسبه کنید.

$V = 1m^3$

بخار	② sat v $v_2 = v_f$
مایع	① $T = 20^\circ C$ $x = 0.8$

قانون اول:  $Q_2 - W_2 = \Delta U \rightarrow Q_2 = \Delta U$

$U = U_f + U_g$

$m u = m_f u_f + m_g u_g \rightarrow u = (1-x) u_f + x u_g$

$u = u_f + x u_{fg}$

$u_1 = (u_f + x u_{fg})_{20^\circ C} = 183.94 + 0.8 \times 2318.98 = 1934.124 \frac{kJ}{kg}$

$v_1 = (v_f + x v_{fg})_{20^\circ C} = (0.001002 + 0.8 \times 57.7987) = 46.23 \frac{m^3}{kg}$

$20 < T_2 < 25^\circ C$

$u_2 = u_g|_{v_1}$

$Q = m \Delta u = \frac{V}{v_1} (u_2 - u_1)$

معرفی خاصیت ترمودینامیکی جدید (انتالی)  $h$

$H = U + PV (kJ) \rightarrow h = \frac{H}{m}$  انتالی  $h$  خاصیت ترمودینامیکی مستقل است

$h = u + Pv$

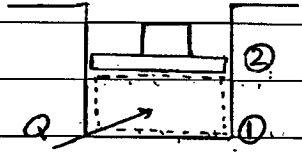
$h = h(T, P)$  انتالی تابع از دما و خاصیت ترمودینامیکی مستقل است

$h = h(T, x)$  دمای اشباع

$h = (h_f + x h_{fg})_T$

گرایش در فشار ثابت:

سیستم گاز داخل سیلندر



$$Q_2 = U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1)$$

$$Q_2 = U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1)$$

$$P_2 = P_1 = P \rightarrow Q_2 = P(V_2 - V_1) + U_2 - U_1$$

$$\rightarrow Q_2 = (U_1 + PV)_2 - (U_1 + PV)_1$$

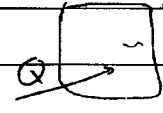
$$\rightarrow \boxed{Q_2 = H_2 - H_1}$$

گرمای درجه:  $(c_p, c_v)$

تعریف  $c_v$   $\rightarrow c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$   $u = u(T, v)$  در هر حالت تعریف شده یک مقدار مشخص دارد  
 باقی حجم مخصوص ثابت

\* تعریف  $c_p$  ربط به فرآیند ندارد و می توان از آن در فرآیندهای غیر حجم ثابت نیز استفاده کرد

تعریف  $c_p \rightarrow c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$   $h = h(T, p)$



$$Q = m \Delta T = m c_v \Delta T \rightarrow c_v = \frac{Q}{m \Delta T}$$

تعیین  $dh$  و  $du$   $\rightarrow$   $Pv = RT$  گاز ایده آل

برای گاز ایده آل، انرژی درونی تنها تابعی از دماست.  $(u = u(T))$

$$* h = u + Pv = u + RT = u(T) + RT \rightarrow h = h(T)$$

برای گاز ایده آل  $\rightarrow c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$   $u = u(T) \rightarrow c_{v0} = \frac{du}{dT}$

$$\boxed{c_{p0} - c_{v0} = R}$$

حالت  $\rightarrow h = u + RT \rightarrow dh = du + R dT \rightarrow c_{p0} dT = c_{v0} dT + R dT$   
 $\rightarrow c_{p0} - c_{v0} = R$

حالت  $\rightarrow c_{v0} = \frac{du}{dT} \rightarrow u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_{v0} dT \approx c_{v0}(T_{avg})(T_2 - T_1)$   
 $c_{v0} = \text{cte}$

$$\rightarrow u_2 - u_1 \approx c_{v0} (T_2 - T_1)$$

حالت  $\rightarrow h_2 - h_1 \approx c_{p0} (T_2 - T_1)$

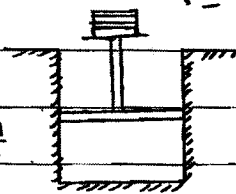
گاز ایده آل که گرمای ویژه برای آن ثابت است

مثال: هوا در داخل یک محفظه میله‌بسته‌شده از دما و فشار 20°C و 100 kPa طی یک فرآیند آدیاباتیک نسبت به دما و فشار 1 MPa متراکم می‌شود. با فرض گران و ظرفیت ثابت برای هوا، کار انتقال حرارت و دمای نهایی را برای این فرآیند تعیین کنید. نشان داده خواهد شد که فرآیند نسبت به دما و فشار آدیاباتیکی که توسط یک گاز کامل انجام شده باشد با  $n = k = \frac{c_p}{c_v}$  مطابقت دارد (هوا را گاز ایده‌آل فرض کنید)

\* با استفاده از جدول  $k_{air} = 1.4$

$PV^n = \text{const} \rightarrow n = k$

$TP^{\frac{1-n}{n}} = \text{const} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$



کار انتقال  $W_2 = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-k} = \frac{R T_2 - T_1}{1-k} = \frac{R T_1}{1-k} \left[ \frac{T_2}{T_1} - 1 \right] = \frac{R T_1}{1-k} \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$

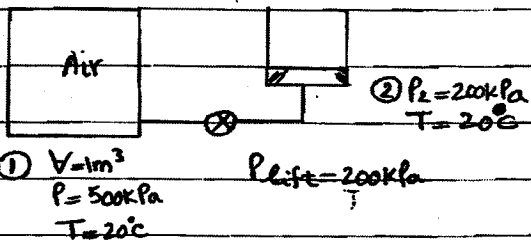
تغییر اول  $q_2 = u_2 - u_1$  (سیستم گاز داخل میله‌بسته)

\* اگر  $n \neq k$  یک فرآیند پلی‌تروپیک که لزوماً آدیاباتیکی نباشد

$q_2 = u_2 + (u_2 - u_1) = \frac{R}{1-n} T_1 \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + c_v T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$

اگر فرض کنیم فرآیند گاز ایده‌آل باشد  $q_2 = \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] T_1 \left[ \frac{R}{1-n} + c_v \right]$

مثال: مقدار انتقال حرارت را بیست آورید



$\frac{P}{P_c} < \frac{1}{5}$  گاز ایده‌آل

$W_2 = 300 \text{ kJ}$  (تغییر اول سیستم گرم داخل میله‌بسته‌شده)  $Q_2 = W_2 = 300 \text{ kJ}$  (چون  $T_2 = T_1$ )

\* در مورد مایعات و جامدات نیز می‌توان فرض کرد که انرژی درونی تابعی از دما و تابع ضعیف از فشار است. برای مایعات و جامدات در فشارهای معمولی:

$u = h - P v \approx 0 \rightarrow u \approx h \rightarrow du \approx dh$   
 $c_p \approx c_v = c$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad \text{گدا لید آه}$$

نوعی دیگر بیان قانون اول ترمودینامیک:

$$Q_2 - W_2 = \Delta E \quad \text{در بازه زمان } \Delta t$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [ \delta Q - \delta W = dE ]$$

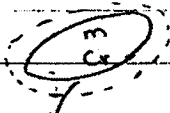
$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$$

↙ نرخ انتقال حرارت
↘ نرخ کار تولیدی (توان)
↘ نرخ تغییرات انرژی سیستم

مثال: جسمی به جرم  $m$  و مساحت جانبی  $A$  و گرمای ویژه  $c$  و دمای اولیه  $T_i$  ناگهان در داخل محیطی با دمای  $T_{\infty}$  فرو برده می شود. در صورتی که نرخ انتقال حرارت جانبی (هرفت) از جسم به محیط از رابطه  $Q = hA(T - T_{\infty})$  داده شده باشد. رابطه ای برای دمای جسم بر حسب زمان بیست آورید.

↑ دمای محیط
↑ مساحت انتقال حرارت جانبی
↑ ضریب انتقال حرارت

[  $\frac{W}{m^2 K}$  ]



$$\dot{Q} = hA(T - T_{\infty}) \quad \dot{W} = 0 \quad \dot{Q} = \frac{dU}{dt} = m \frac{du}{dt} = mc \frac{dT}{dt}$$

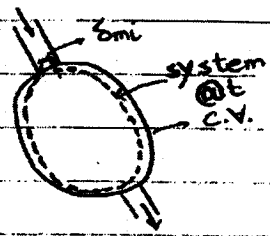
$$hA(T - T_{\infty}) = mc \frac{dT}{dt} \quad \frac{dT}{T(t) - T_{\infty}} = \frac{hA}{mc} dt \quad (T_{\infty} = T_i)$$

$$\rightarrow T(t) = T_{\infty} + (T_i - T_{\infty}) \exp\left(-t \frac{hA}{mc}\right)$$

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

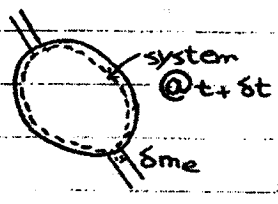
فصل ۳

قانون بقای جرم



system :  $(m_{C.V.})_t + \delta m_i$   
@ t

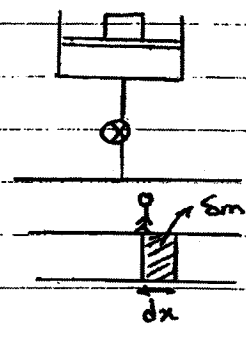
system :  $(m_{C.V.})_{t+\delta t} + \delta m_e$   
@ t +  $\delta t$



$d(m)_{sys} = 0 \rightarrow (m_{C.V.})_t + \delta m_i = (m_{C.V.})_{t+\delta t} + \delta m_e$

$\Rightarrow \lim_{\delta t \rightarrow 0} [0 = \frac{(m_{C.V.})_{t+\delta t} - (m_{C.V.})_t}{\delta t} + \frac{\delta m_e}{\delta t} - \frac{\delta m_i}{\delta t}]$

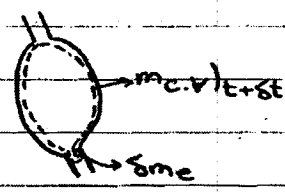
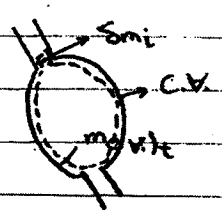
$\Rightarrow 0 = \frac{dm_{C.V.}}{dt} + \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i \Rightarrow \boxed{0 = \frac{dm_{C.V.}}{dt} + \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i}$



$\delta m = \frac{\delta V}{v} = \frac{A \delta x}{v} \rightarrow \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta t} = \frac{A}{v} \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta x}{\delta t}$

$\dot{m} = \rho A V$  *مؤلفه افودی سرعت بیان*

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل



$$\begin{cases} \delta W_{C.V.} = \delta W_{shaft} + \delta W_{exp} + \delta W_{flow} \\ \delta W_{flow} = P_e \delta V_e - P_i \delta V_i \\ = P_e v_e \delta m_e - P_i v_i \delta m_i \end{cases}$$

داده اول  $\rightarrow \delta Q_{C.V.} - \delta W_{C.V.} = dE)_{sys}$

$\Rightarrow \delta Q_{C.V.} - \delta W_{C.V.} = \frac{[E_{C.V.}]_{t+\delta t} + \delta m_e e_e}{E_{sys,t+\delta t}} - \frac{[E_{C.V.}]_t + \delta m_i e_i}{E_{sys,t}}$

\*  $e = gz + \frac{V^2}{2} + u$

$\Rightarrow \delta Q_{C.V.} - \delta W_{C.V.} = [E_{C.V.}]_{t+\delta t} - [E_{C.V.}]_t + \delta m_e e_e - \delta m_i e_i$

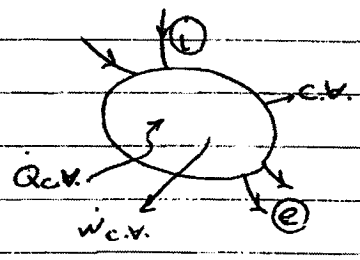
$\Rightarrow \delta Q_{C.V.} - (\delta W_{shaft} + \delta W_{exp}) = dE)_{C.V.} + (P_e + P_e v_e) \delta m_e - (P_i + P_i v_i) \delta m_i$

۲۴

$$\Rightarrow \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} = \frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} + [e_i + P_i v_i] \dot{m}_e - [e_i + P_i v_i] \dot{m}_i$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} = \frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e (h + \frac{V^2}{2} + gz) \dot{m}_e - \sum_i (h + \frac{V^2}{2} + gz) \dot{m}_i$$

اولی ترین حالت قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل



برای حالت کلی

$$\text{mass: } 0 = \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i$$

$$\text{1st law: } \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} = \frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e (h + \frac{V^2}{2} + gz) - \sum_i \dot{m}_i (h + \frac{V^2}{2} + gz)$$

$$\frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} = \frac{d(m e)}{dt} \Big|_{c.v.} = e \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} + m \frac{de}{dt} \Big|_{c.v.}$$

حالت steady-state

$$\frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} = 0 \leftarrow \text{تمام نقاط حجم کنترل با گذشت زمان در حالت ثابت هستند}$$

حالت steady flow

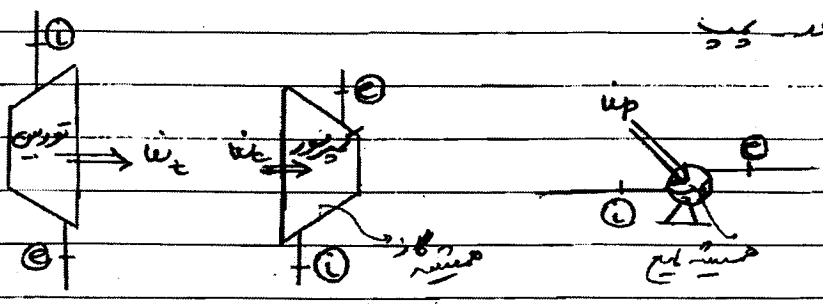
$$\frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} = 0 \leftarrow \text{انبارش شدن و کاهش یافتن حجم در حجم کنترل وجود ندارد}$$

قانون اول ترمودینامیک در حالت (steady state - steady flow)

$$\text{mass: } \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i = 0$$

$$\text{1st law: } \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = \sum_e \dot{m}_e (h + \frac{V^2}{2} + gz) - \sum_i \dot{m}_i (h + \frac{V^2}{2} + gz)$$

در دستگاهی که در آن بتوانیم تولید یا مصرف انرژی داشته باشیم  
تولید کننده یا مصرف کننده



برای همه دستگاه ها  $m_i = m_e = \dot{m}$  : بقای جرم

قانون اول  $\dot{Q}_{c.v.} = 0$

تغییر انرژی پتانسیل و تغییر انرژی جنبشی قابل صرف نظر هستند.

$$\dot{W}_{c.v.} = m(h_e - h_i) \Rightarrow \boxed{\dot{W}_{c.v.} = m(h_i - h_e)}$$

قابل استفاده برای توربین، کمپرسور و پمپ

$$\dot{W}_{c.v.} = \frac{\dot{W}_{c.v.} (kJ)}{m} \rightarrow \dot{w}_{c.v.} = h_i - h_e$$

توربین  $\Rightarrow \dot{W}_t = \frac{\dot{W}_t}{m} = \dot{w}_{c.v.}$  کمپرسور  $\Rightarrow \dot{W}_c = -\dot{w}_{c.v.}$

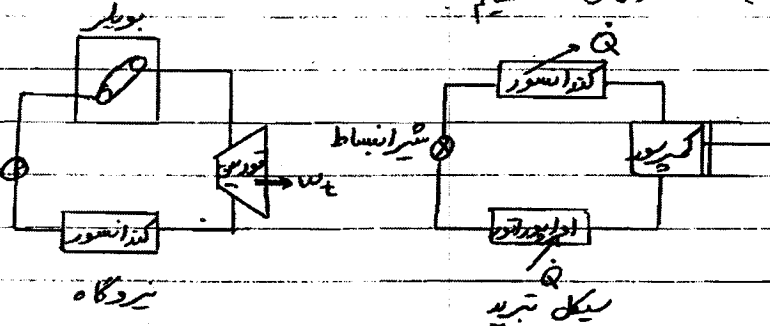
پمپ  $\Rightarrow \dot{W}_p = -\dot{w}_{c.v.}$

دستگاه هایی که در آنها انتقال حرارت تولید می شود یا مصرف می شود (همراه با تغییر حالت) بویلر - کندانسور - اداپراتور

توازن جرم:  $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

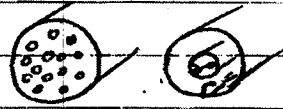
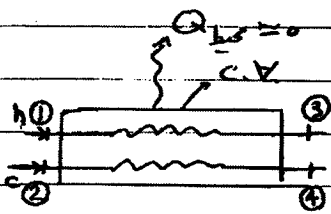
قانون اول:  $\dot{Q}_{c.v.} = m(h_e - h_i) \rightarrow \dot{q}_{c.v.} = h_e - h_i$

$\dot{q}_{c.v.} = \frac{\dot{Q}_{c.v.} (kJ)}{m}$  همه توان از CPDT استفاده می شود چون از گاز و مایع در هر دو استفاده می شود



بدنه ها و حرارت ایجاد کننده ها و حرارت ها

خاص غیر مستقیم



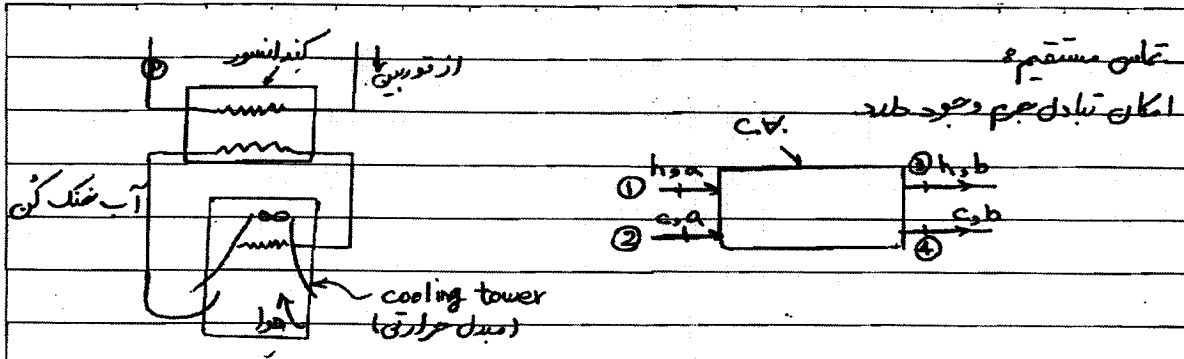
اگر بین دو قسمت سرد و گرم انتقال جرم وجود داشته باشد:

توازن جرم:  $\begin{cases} \dot{m}_{h,1} = \dot{m}_{h,3} \equiv \dot{m}_h \\ \dot{m}_{c,2} = \dot{m}_{c,4} \equiv \dot{m}_c \end{cases}$

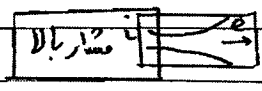
قانون اول:  $0 = (\dot{m}_h h_3 + \dot{m}_c h_4) - (\dot{m}_h h_1 + \dot{m}_c h_2)$

$\Rightarrow 0 = \dot{m}_h (h_3 - h_1) - \dot{m}_c (h_2 - h_4)$





قانون جرم:  $m_3 + m_4 = m_1 + m_2$   
 قانون انرژی:  $0 = (m_{h3b} h_3 + m_{c3b} h_4) - (m_{h1a} h_1 + m_{c1a} h_2)$



Nozzle: (توسعه)

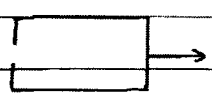
فشار بالایی بالاتر است و به همین دلیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود

$P_i \gg P_e$   
 $V_e \gg V_i$

SSSF:  $Q = \dot{W} = \sum_e \dot{m}_i (h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i) - \sum_i \dot{m}_e (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e)$

قانون جرم:  $m_e = m_i = m \Rightarrow 0 = m(h_e + \frac{V_e^2}{2}) - m(h_i + \frac{V_i^2}{2})$

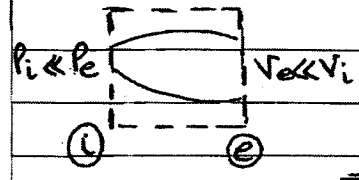
انرژی گاز کال:  $\frac{V_e^2}{2} = c_p (T_i - T_e)$



دیفوزر:

سرعت بالا را به فشار تبدیل می‌کند

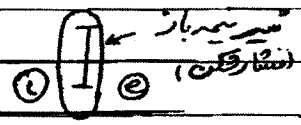
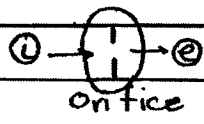
$Q = 0, W = 0$



قانون انرژی:  $0 = m(h_2 - h_1) - m \frac{V_2^2}{2} + m \frac{V_1^2}{2}$   
 $\frac{V_2^2}{2} = (h_2 - h_1)$

شماره بالایی:

فشار بالایی و انرژی جنبشی



انرژی جنبشی بالایی را ایجاد می‌کند

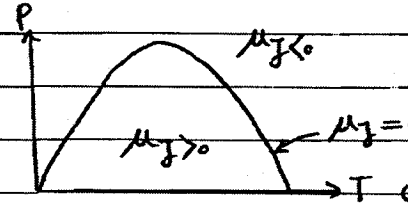
اما در مقابل آن انرژی جنبشی خود را تلف می‌کند و به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند

قانون انرژی:  $h_i = h_e \Rightarrow h \rho V = u$   
 حالت های مختلف:  $h \rho V = u$   
 به کاهش دما برای افزایش سرعت دانه

$\sqrt{kRT}$  - سرعت استقامتی

ضریب زود-تاسون:  $\mu_g = \frac{\partial T}{\partial P} \Big|_h$  (خاصیت ترمودینامیکی)  
 \* این ضریب به فرآیند انجام شده بستگی ندارد. در هر حالت مقدار مشخصی دارد

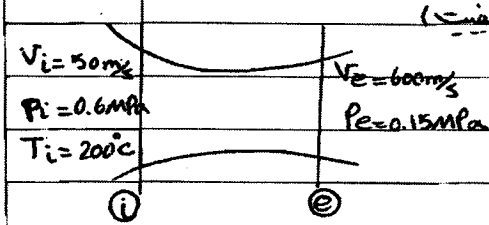
$T = T(P, h)$



منحنی دمای زود-تاسون  
 \* فقط به جنس ماده بستگی دارد.  
 \* اگر  $\mu_g > 0$  باشد پس از افت فشار تا آن حدی که  $\mu_g = 0$  دارد.

\* برای گاز ایده آل:  $\mu_g = 0$  زیرا  $h = h(T)$  لذا  $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = 0$

مسئله در خروجی‌های درجه‌بندی (شماره بودن کیفیت)



قانون اول:  $h_e = h_i + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2}$   
 $\Rightarrow h_e = \frac{V_e^2}{2} + \frac{V_i^2}{2} + h_i$

$h_i = h \Big|_{0.6 MPa, 200 C} = 2850.1 \frac{kJ}{kg}$

$\Rightarrow h_e = 2850.1 + \frac{50^2}{2 \times 1000} - \frac{600^2}{2 \times 1000} = 2671.4 \frac{kJ}{kg}$

$h_f \Big|_{0.15 MPa} = 467.08 \frac{kJ}{kg}$ ,  $h_g = 2693.6 \frac{kJ}{kg}$

@ sat:  $T_e = T_g \Big|_{0.15 MPa} = 111.37 C$        $x = \frac{h_e - h_f}{h_g - h_f} = 0.99$

شرایط کنده:  $0 = \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} + m_e - m_i$

قانون اول:  $Q - W = \frac{dU}{dt} \Big|_{c.v.} + m_e h_e - m_i h_i$

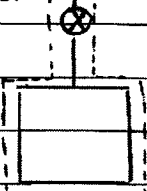
با انتگرال گیری معادله بالا و این که  $Q$  و  $W$  ثابت می‌مانند و  $U$  در حالت پایدار است

$\int_0^t dt \Rightarrow 0 = (m_2 - m_1) u_{c.v.} + m_e h_e - m_i h_i$

قانون اول:  $Q_{c.v.} - W_{c.v.} = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.} + m_e h_{e,avg} - m_i h_{i,avg}$

ارزی درونی متوسط داخل حجم کنده  
 $h_{e,avg} = \frac{h_e + h_g}{2}$        $h_{i,avg} = \frac{h_i + h_g}{2}$

$N_2$   
1MPa, 20°C



مثال: خط اولی دمای گاز نیتروژن در فشار 1MPa و دمای 20°C است. شیر را باز می‌کنیم تا مخزن هم فشار بالواید شود. تعیین کنید که چه مقدار حجم وارد مخزن شده است؟ فرض کنید فرآیند آدیاباتیک است. (نیتروژن را گاز کامل فرض کنید)

mass :  $m_1 = 0, m_e = 0 \Rightarrow m_2 = m_i$   
 1<sup>st</sup> law :  $\dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{C.V.} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$

$\Rightarrow 0 = m_2 u_2 - m_i h_i \Rightarrow u_2 = h_i = u_i + P_i v_i = u_i + R T_i$   
 $\Rightarrow u_2 - u_i = R T_i \Rightarrow C_{v0} (T_2 - T_i) = R T_i \Rightarrow T_2 = T_i \left( \frac{R}{C_{v0}} + 1 \right)$   
 $\Rightarrow T_2 = \frac{C_{p0}}{C_{v0}} T_i = k T_i = 1.4 (293) = 410.2 K = 137.2^\circ C$

$m_2 = \frac{P_2 V_2}{R T_2} = \frac{1000 \times 1}{\frac{8.3143}{28} (410.2)} = 8.21 \text{ kg}$

اگر می‌خواهیم در نظر بگیریم که گاز یک گاز ایده‌آل است (آدیاباتیک است)  $\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \Big|_{C.V.} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$

@ a reference point  $o \rightarrow u_o \rightarrow \begin{cases} u = u_o + C_{v0} (T - T_o) \\ h = u + P v = u_o + C_{v0} (T - T_o) + R T \end{cases}$

$\dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} = \frac{d(mu)}{dt} \Big|_{C.V.} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$

$\rightarrow \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} = m \frac{du}{dt} + u \frac{dm}{dt} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$

$\rightarrow \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} = m C_{v0} \frac{dT}{dt} + [u_o + C_{v0} (T - T_o)] \frac{dm}{dt} + \sum_e m_e [u_o + C_{v0} (T - T_o) + R T]_e - \sum_i m_i [u_o + C_{v0} (T - T_o) + R T]_i$

$\rightarrow \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} = m C_{v0} \frac{dT}{dt} + C_{v0} T \frac{dm}{dt} + \sum_e m_e (C_{v0} + R) T_e + \sum_i m_i (C_{v0} + R) T_i + \left\{ [u_o - C_{v0} T_o] \frac{dm}{dt} + \sum_e m_e (u_o - C_{v0} T_o) - \sum_i m_i (u_o - C_{v0} T_o) \right\}$   
 $(u_o - C_{v0} T_o) \left[ \frac{dm}{dt} + \sum_e m_e - \sum_i m_i \right]$   
 صفر (قانون بقای جرم)

نتیجه اگر گاز کامل باشد، در تحلیل قانون اول ترمودینامیک می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$h = c_p T$$

(تحلیل US-UF هم کنترل)

$$u = c_v T$$

جمع بندی: تحلیل های مختلف قانون اول ترمودینامیک:

systems  $Q_2 - W_2 = U_2 - U_1 \rightarrow \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$

$$\text{SSSF: } \dot{Q} - \dot{W} = \sum m_e (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e) - \sum m_i (h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i)$$

$$\text{US-UF: } \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{c.v.} + m_e h_{e,avg} - m_i h_{i,avg}$$

قانون دوم ترمودینامیک

فصل ۸۷

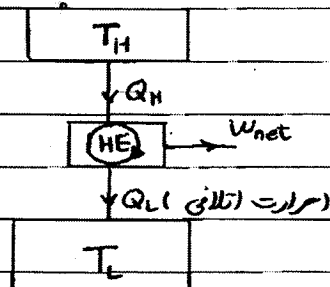
\* بعضی از فرآیندها علی رغم اینکه قانون اول ترمودینامیک را نقض نمی کنند، امکان پذیر نیستند.

دو بیان قانون دوم ترمودینامیک:

① کلوسین لانگ و غیر ممکن است بتواند دستگاهی ساخت که در یک چرخه ترمودینامیک عمل کند تنها با یک منبع حرارتی در تماس باشد و تنها تعامل دیگری با پیرامون و معادل صعود و نزول باشد (تعادل کاری) این بیان در مورد موتورهای حرارتی است.

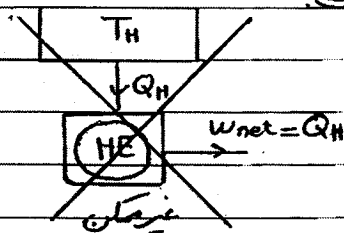
\* موتور حرارتی وسیله ای است که گرما را از یک منبع دمای بالا دریافت می کند و آن را به یک کار مکانیکی تبدیل می کند.

\* الزاماً باید دستگاه با یک منبع دمای پایینتر در تماس باشد به عبارت دیگر برای تولید کار به اختلاف دما نیاز داریم.



رانندگی حرارتی  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

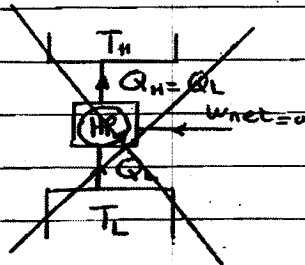
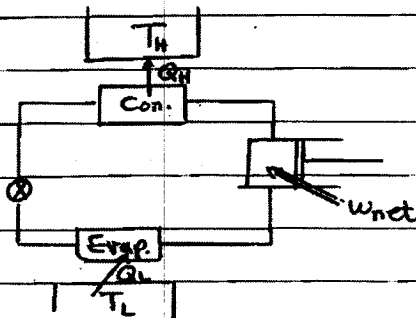
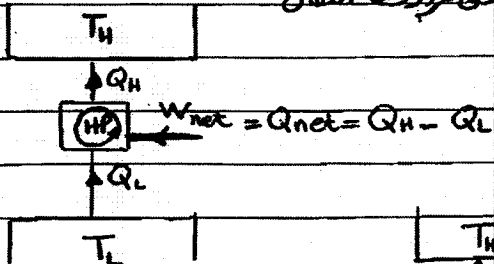
\* رانندگی حرارتی ۱۰۰٪ امکان پذیر نیست.



⑤ بیان کلانویس و غیر ممکن است دستگاهی ساخت که در یک چرخه ترمودینامیک عمل کند و تنها تعاملش با پیرامون این باشد که حرارت را از یک منبع دمای پایین گرفته و آن را عیناً به یک منبع دمای بالا تحویل دهد.

\* به عبارت دیگر برای چنین فرآیندی حتی به یک منبع کار نیاز است.

\* هر دو سیستمی که حرارت را بر خلاف جریان مادی حرارت انتقال دهد و به حرارت نامیده می شود



ضریب عملکرد (COP)

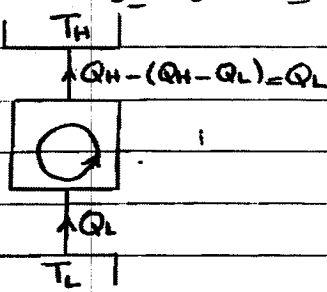
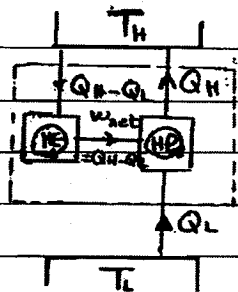
$\beta \equiv \frac{Q_L}{W_{net}}$  (منظور سرد کردن است) (مورد استفاده از COP)

\* هر دو حرارت می توانند منظور گرم کردن یا سرد کردن یک مکان باشد

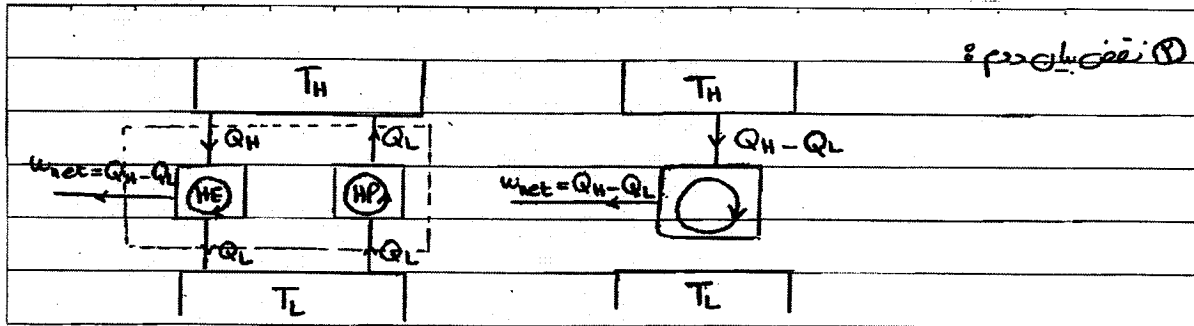
$\beta' = \frac{Q_H}{W_{net}} > 1$  (منظور گرم کردن است)

$\beta' = \beta + 1$

\* دو بیان قانون دوم ترمودینامیک معادل یکدیگرند



① نقض بیان اولی



نقص اول کارنو؟  
 به ازای دو منبع حرارتی ساده و موتور حرارتی، بالاترین میزان رانندگی چقدر است؟  
 قضایای اول و دوم کارنو؟

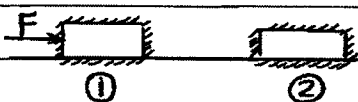
نقص اول کارنو؟ رانندگی حرارتی یک موتور حرارتی برگشت پذیر که بین دو منبع حرارتی  $T_H$  و  $T_L$  داده شده در حال کار است از رانندگی تمامی موتورهای حرارتی برگشت ناپذیری که بین همان دو منبع در حال کارند بیشتر است.

نقص دوم کارنو؟ رانندگی حرارتی تمامی موتورهای حرارتی برگشت پذیری که بین دو منبع حرارتی داده شده در حال کارند، یکسان است.

سبب برگشت پذیری به سببی گفته می شود که فرآیندهای آن تماماً برگشت پذیر باشند. فرآیند برگشت پذیر یک فرآیند در صورتی برگشت پذیر است که بین آن بتوان سیستم را به حالت اولیه بازگرداند به طور خالص. پس از انجام فرآیندهای رفت و برگشت هیچ گونه اثر خالصی روی پیرامون گذاشته نشود. این عملیات دیگر پس از بازگشتن سیستم به حالت اولیه پیرامون نیز به حالت اولیه پس از شروع فرآیند بازمیگردد.

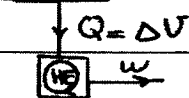
همه فرآیندهای ترمودینامیکی برگشت ناپذیر هستند.

عواملی که باعث می شوند تا فرآیندهای برگشت ناپذیر شوند؟



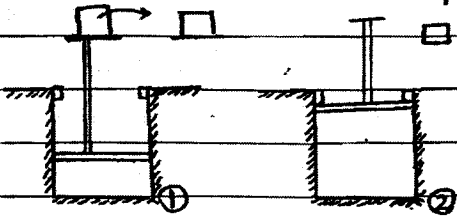
اصطکاک و نیروی تریبومون نابطالت اولیه از گرما

1st law:  $Q_1 - W_2 = \Delta U \rightarrow \Delta U = W_2$



نقص قانون دوم ترمودینامیک به بیان کارون بیانگردد

۲- انبساط غیر متعادلیه انبساطی که در طی آن سیستم تعادل نهایی باشد



$W=0$

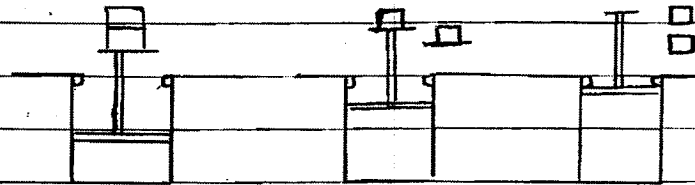
باید روی سیستم کار انجام دهیم که در نتیجه آن

انرژی آن زیاد خواهد شد. پس این انرژی اضافه

با آن طریق حرارت به سیال می‌دهیم که در نتیجه

کار انجام می‌دهد گرفته شد و به آن حرارت داده شده است

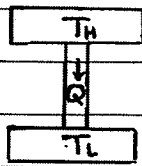
(حرارت = انرژی بی‌انرژی، کار = انرژی بالانرژی)



$W > 0$

اختلاف درجه حرارت می‌تواند باعث برگشت پذیری بیشتر از هم می‌گردد تا ایزر

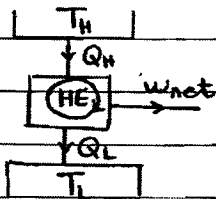
۳- انتقال حرارت در اختلاف دمای محدود



برای برگشت کردن این فرآیند باید از سیال کار گرفته شود.

$Q = AV \Delta T$   $\Delta T \rightarrow$   $\begin{cases} \uparrow t \\ \uparrow A \end{cases}$

برگشت پذیری بیشتر



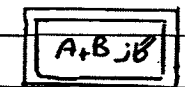
برای اینکه فرآیند برگشت پذیر باشد

در این فرآیند می‌توان از کار تولیدی در جهت برگشت

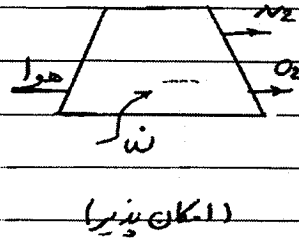
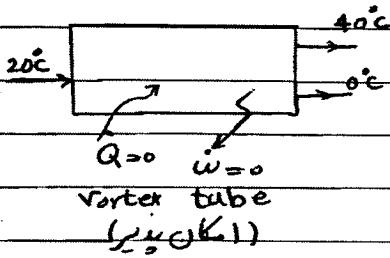
استفاده کرد.

۴- خلوط نسبی

هرگونه دلگشایی میان خود بخودی، برگشت ناپذیر است

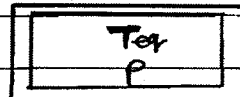
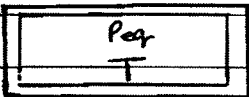
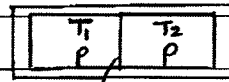
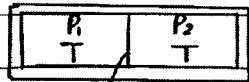






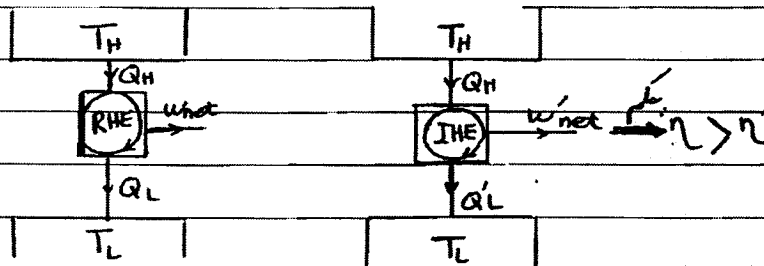
۵- چگونگی های مشابه

۶- غیر یکپارچه دما و فشار که منجر به حالت تعادل می شوند: (برگشت ناپذیری درونی)



در حالت خود به خودی، هیچ کاری نیاز نیست در حالی که برای انجام عملی این فرآیندها نیاز است  
 \* برگشت ناپذیری درونی در داخل فرآیند اتفاق می افتد  
 \* فرآیندهای برگشت ناپذیری درونی = فرآیندهای شبه تعادلی

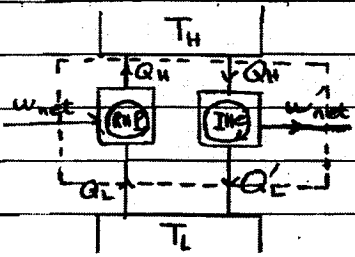
تفسیر اول: به اندازه دو منبع حرارتی دما گرفته و موتور حرارتی برگشت ناپذیر از آنها را در دماهای بالاتر نسبت به  
 هر موتور حرارتی برگشت ناپذیری است که بین این دو منبع کار می کند.



انتی =

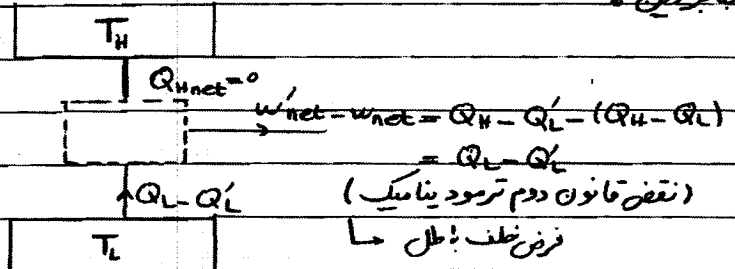
فرض کنیم که دماهای حرارتی موتور برگشت ناپذیر از دماهای حرارتی موتور برگشت ناپذیر بیشتر باشد  
 (برهان خلف) در این صورت به اندازه Qm های یکسان

$$w'_{net} > w_{net} \quad , \quad Q'_L < Q_L$$



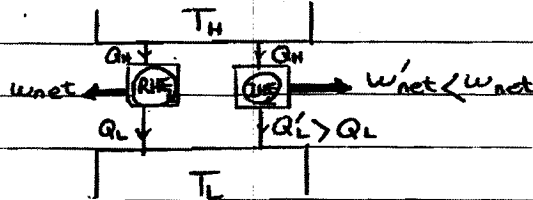
از آنجایی که موتور حرارتی برگشت پذیر است، هنگامی که به صورت  
عکس حرارتی کار می کند، به همان میزان کار دریافت می کند که اگر  
موتور حرارتی با آن هم‌فاز می کند.

بنابراین:

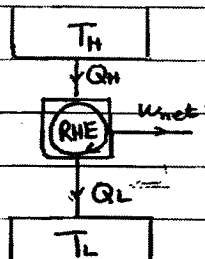


تقریباً در هر دو طرف یکسان: در این موتور حرارتی، موتورهای حرارتی برگشت پذیر که  
بین دو منبع حرارتی در حال کارند، با هم برابرند.

نتیجه: بطور کلی:



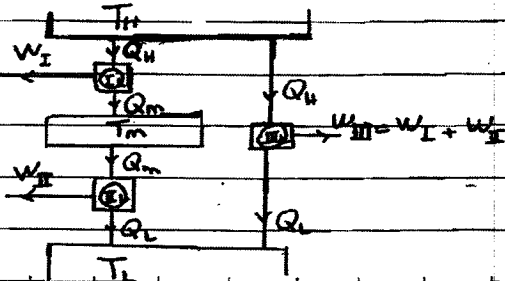
نتیجه: تقریباً در هر دو طرف یکسان: در این موتور حرارتی، موتور برگشت پذیر که بین دو منبع حرارتی در حال کارند، با هم  
از لحاظ آن در منبع است.



$$\eta_{C,H} = \frac{w_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$\eta_{C,H,RHE} = f(T_L, T_H)$$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \psi(T_L, T_H)$$



$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{Q_L}{Q_m} \times \frac{Q_m}{Q_H}$$

$$\Rightarrow \psi(T_L, T_H) = \psi(T_L, T_m) \times \psi(T_m, T_H)$$

$$\Rightarrow \psi(T_L, T_H) = \frac{\phi(T_L)}{\phi(T_H)}$$

از طرف:  $\eta_{th} = 1 - \frac{Q_c}{Q_H} = 1 - \frac{\Phi(T_L)}{\Phi(T_H)} = \frac{\Phi(T_H) - \Phi(T_L)}{\Phi(T_H)} \rightarrow \Phi(T_H) > \Phi(T_L)$

$$\left( \frac{Q_c}{Q_H} = \frac{\Phi(T_L)}{\Phi(T_H)} \right)$$

پس باید تابع  $\Phi$  صعودی باشد.

به صورت کاملاً اختیاری این تابع به صورت زیر انتخاب شده

$$\Phi(T) = T$$

بنابراین

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

\* انتخاب  $\Phi(T) = T$  مبنای برای تعریف دمای مطلق کلوین می باشد. لذا با تغییر انتخاب  $\Phi(T)$  مقیاس کالری متفاوت خواهد شد.

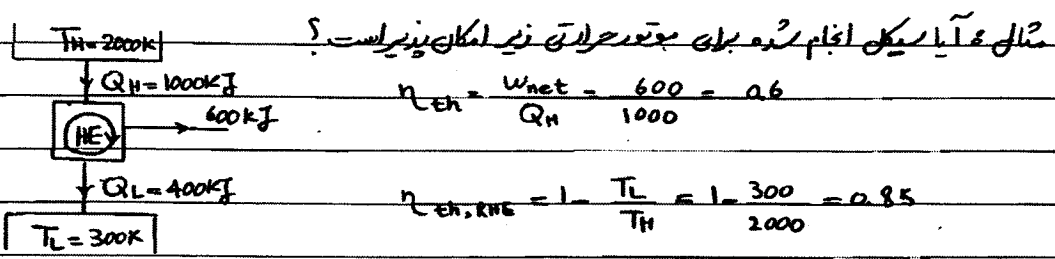
\* برای کار کردن یک موتور حرارتی برگشت پذیر باید فرآیندهای جذب و دفع گرما هم دا باشند سیکل کارنو

و سیکل کارنو به عنوان یک نمونه از سیکل های برگشت پذیر است که می تواند بین دو دمای  $T_H$  و  $T_L$  کار کند. لازم به ذکر است که سیکل کارنو تنها سیکل اجرایی یک موتور حرارتی برگشت پذیر می باشد. سیکل کارنو متشکل از ۴ فرآیند است و

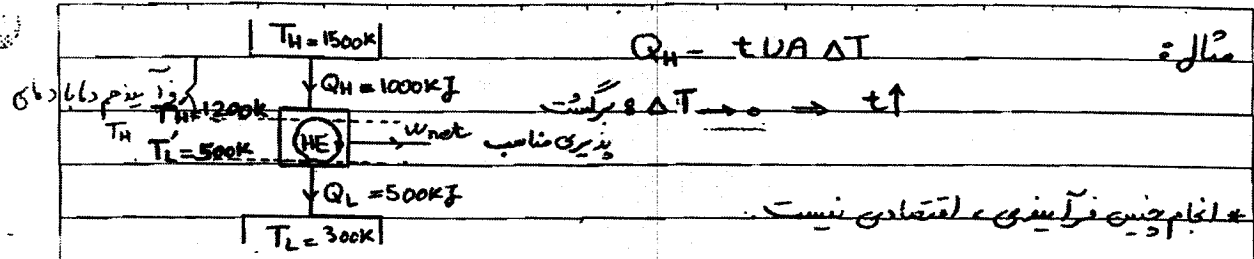
فرآیند ۱ و ۲ یک فرآیند هم دمای برگشت پذیر جذب حرارت از منبع دا بالا فرآیند ۲ و ۳ یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر انبساطی است که طی آن کار تولید شده و دا از  $T_H$  به  $T_L$  کاهش پیدا کند.

فرآیند ۳ و ۴ یک فرآیند هم دمای برگشت پذیر دفع حرارت به منبع دا پایین فرآیند ۴ و ۱ یک فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر تراکنی است که طی آن دمای سیستم از  $T_L$  به  $T_H$  افزایش پیدا می کند.

دو فرآیند هم عم سیکل استرلینگ / دو فرآیند هم فشار سیکل لیکسون



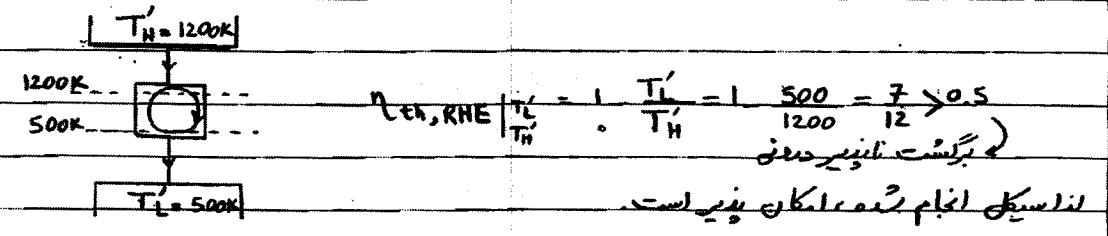
بنابراین سیکل مورد نظر برگشت پذیر و ممکن است.



\* در این حالت جدید، پرونده های جنب و دفع حرارت، برگشت پذیر درون هستند.

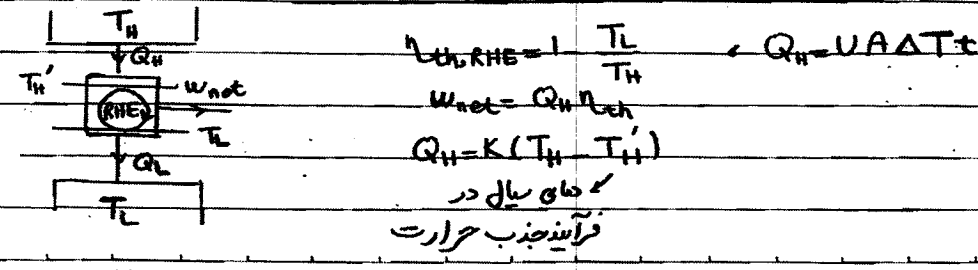
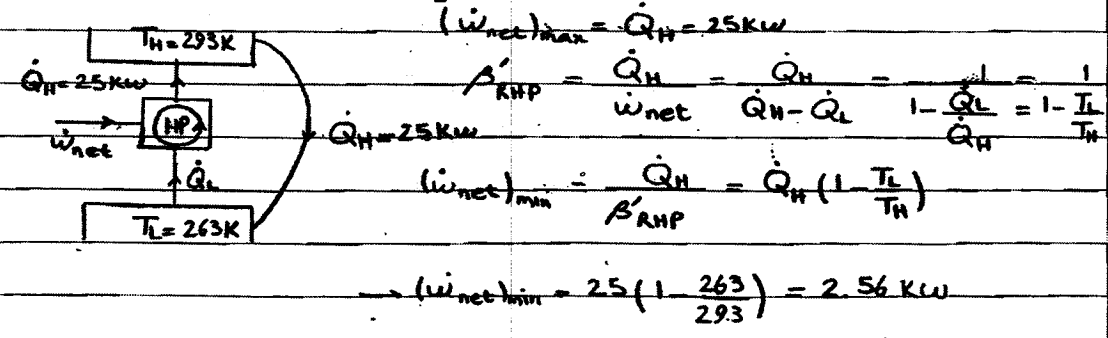
$$\eta_{ch} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{500}{1000} = 0.5$$

$$\eta_{ch, RHE} \left| \frac{T_L}{T_H} \right. = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{1500} = 0.8$$



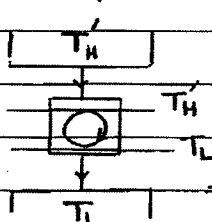
\* اگر  $\eta_{ch, RHE} \left| \frac{T_L}{T_H} \right. = \eta_{ch} \rightarrow$  بگشت پذیر درون

مثال: از یک پمپ حرارتی برای گرم کردن خاندانی در زمستان استفاده می شود برای ثابت نگه داشتن دمای داخل خانه در دمای 20°C در حالی که بیرون 10°C - است. لازم است 25kW حرارت به طور دائم به داخل خانه منتقل شود. (با حرارتی) حالتی می توان معرفی چرخه پمپ حرارتی جدیدی توانمند باشد؟



۲۷

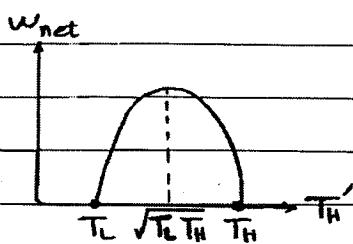
با ثابت نگه داشتن  $k$ ،  $T_H$  و  $T_L$  و تنها با تغییر  $T_H'$  بررسی می‌کنیم:



$$\eta_{CH} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

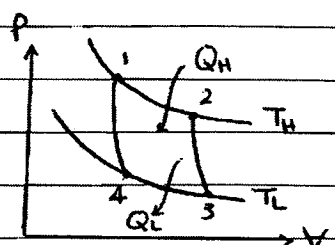
$$W_{net} = Q_H \eta_{CH} = k(T_H - T_H') \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$$

برگشت پذیری داخلی و خارجی



$$\frac{dW_{net}}{dT_H'} = 0 \rightarrow T_H' = \sqrt{T_L T_H}$$

داده به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم تا بیشترین کار حاصل شود



دایه سیال در فرآیند جذب حرارت:  $T_H$

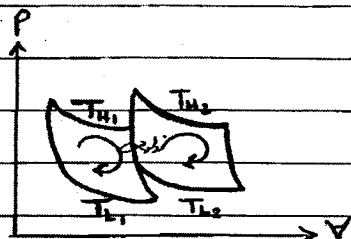
دایه سیال در فرآیند دفع حرارت:  $T_L$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow \frac{Q_L}{T_L} = \frac{Q_H}{T_H}$$

(برگشت پذیری درونی)

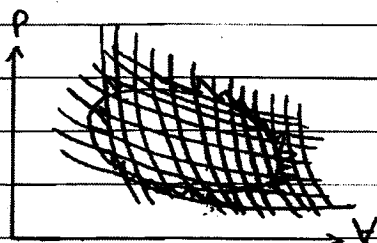
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \int_3^4 \frac{\delta Q}{T} + \int_4^1 \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

\* اگر دو سیال کارند، در نظر بگیریم:



- ① یک  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$
- ② یک  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$
- یک  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$

\* برای یک سیال دایه برگشت پذیر درونی، داریم:



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

فرآیند برگشت پذیر درونی

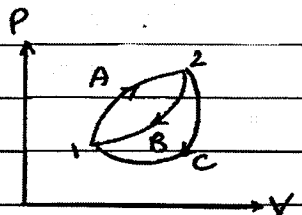
$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad \left( \frac{Q_H}{T_H} < \frac{Q_L}{T_L} \right)$$

فرآیند برگشت پذیر درونی

Clausius Inequality

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

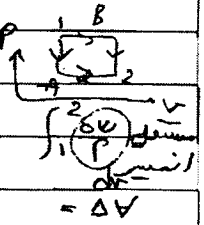
تحلیل قانون دوم ترمودینامیک برای فرآیندها  
 A و B فرآیند برگشت پذیر درونی هستند.



AB سبک  $\rightarrow$  برگشت پذیر درونی  $\rightarrow \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$   
 $\rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} |_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} |_B = 0$  (I)

AC سبک  $\rightarrow$  برگشت پذیر درونی  $\rightarrow \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$   
 $\rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} |_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} |_C = 0$  (II)

(I) - (II)  $\rightarrow \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} |_B = \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} |_C \rightarrow \int \frac{\delta Q}{T}$  مستقل از مسیر



$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{int. ver} = \Delta S \quad (\text{انتروپی } S)$$

$S = k_B \ln W$   
 $\uparrow$   
 ثابت بولتزمن

## فصل ۱۱: انتروپی

قانون دوم ترمودینامیک و انتروپی در دایره صفر مطلق صفر است

$$\Delta S = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int. rev.}} \rightarrow [S] = \frac{kJ}{K}$$

الغایم فرکیند از صفر مطلق  $\rightarrow S_1 - S_0 = \int_0^1 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int. rev.}}$

$$s = \frac{S}{m} \rightarrow [s] = \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

انتروپی به عنوان یک خاصیت ترمودینامیکی تابعی از هر دو خاصیت مستقل ترمودینامیکی است.

$$S = S(T, P)$$

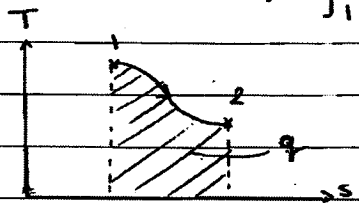
$$s = s(T, x)$$

$$S = S_f + S_g \rightarrow m s = m_f s_f + m_g s_g$$

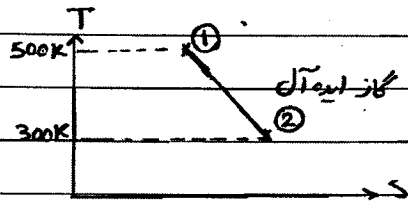
$$\rightarrow s = (1-x) s_f + x s_g \rightarrow \boxed{s = s_f + x s_{fg}}$$

$$\Delta S = \int_1^2 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int. rev.}} \rightarrow dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int. rev.}} \div m \rightarrow ds = \left( \frac{\delta q}{T} \right)_{\text{int. rev.}}$$

$$\rightarrow \delta q = T ds \text{ (int. rev.)} \rightarrow q = \int_1^2 T ds \text{ (int. rev.)}$$



انتروپی و حرارت دایره حالت یکسان هستند اما امکان دارد که یک سیستم با وجود دریافت حرارت دایره کانونی پیدا کرده باشد.

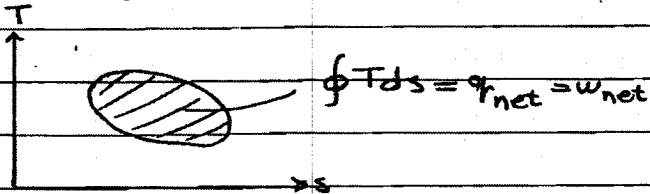


$$\Delta U = Q_2 - W_2$$

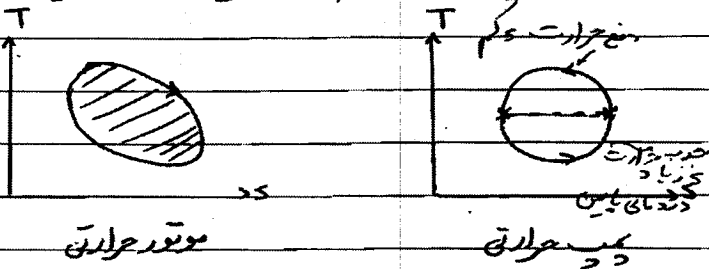
بدلیل انجام کار با منبع آسان است.

h/m

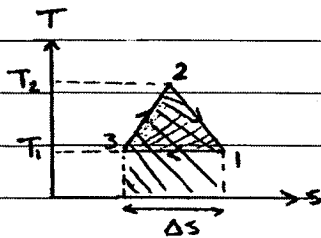
$$\int_1^2 T ds = q_2 \rightarrow \oint T ds = q_{net} = w_{net} \quad (\text{int. rev})$$



\* اگر سیکل در نمودار T-s در جهت ساعتگرد انجام شود، سیکل مورد نظر، سیکل یک موتور حرارتی است  
 \* اگر سیکل در نمودار T-s در جهت پادساعتگرد انجام شود، سیکل مورد نظر، سیکل یک پمپ حرارتی است



مثال: سیکل مورد نظر مطابق نمودار صورت یک موتور حرارتی کار می کند.  
 رابطه حرارتی آن را بدست آورید.



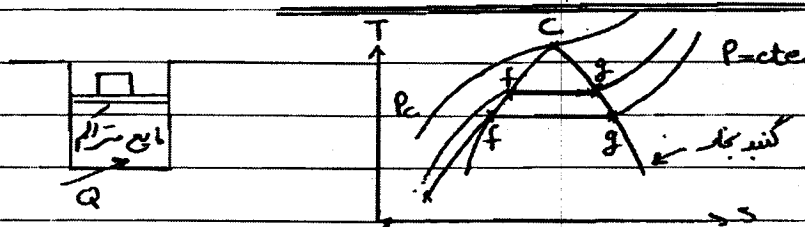
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H}$$

$$w_{net} = \frac{1}{2} (T_2 - T_1) \Delta s$$

$$q_H = \frac{q_2}{3} + 2q_1 = \frac{1}{2} (T_2 - T_1) \Delta s + T_1 \Delta s$$

$$\Rightarrow \eta_{th} = \frac{\frac{1}{2} (T_2 - T_1) \Delta s}{\frac{1}{2} (T_2 + T_1) \Delta s} = \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1}$$

\* سیکل انجام شده در این فرآیند برگشت پذیر درونی و برگشت ناپذیر خارجی است.





قانون دوم ترمودینامیک برای فرآیندهای برگشت ناپذیر درونی :

یک از فرآیندهای برگشت ناپذیر و یک از فرآیندهای برگشت پذیر

$$\int_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \Rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B = 0 \quad (I)$$

AC یک فرآیند برگشت ناپذیر است

$$\int_{irrev} \frac{\delta Q}{T} < 0 \Rightarrow \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_A + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C < 0 \quad (II)$$

$$\int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C < \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B \Rightarrow \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_C < \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_B, \text{ int. rev.} = S_1 - S_2$$

برداشت از قایل فوق :

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{irrev.} < S_2 - S_1$$

این قانون دوم ترمودینامیک برای فرآیندهای ترمودینامیکی که در قالب سیستم انجام می شوند:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_g$$

سازگار فرآیندهای برگشت ناپذیر درونی (درون سیستم) (اترودی تولیدی) ( $S_g > 0$ )

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_g \quad (\delta S_g > 0)$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_g \quad (\delta S_g = 0)$$

$$\delta Q > 0 \Rightarrow dS > 0$$

$$dS < 0 \Rightarrow \delta Q < 0$$

نتیجه :

دو رابطه پایه ای ترمودینامیک :

به طور ذهنی یک فرآیند برگشت ناپذیر درونی (که به نظر می آید) را بسط دهید تا حالتی که برای آن اترودی معلوم است تا حالتی که می خواهیم برای آن اترودی تعیین کنیم، در داخل یک مجموعه می کشیم و می بینیم چه اتفاقی می افتد.

$$\left. \begin{aligned} \delta Q - \delta W = dU \\ \delta W = PdV, \delta Q = TdS \end{aligned} \right\} \Rightarrow TdS - PdV = dU$$

فرآیند برگشت ناپذیر

$$\Rightarrow \boxed{TdS = dU + PdV}$$

$$\boxed{TdS = du + PdV}$$

$$H = U + PV \rightarrow U = H - PV \rightarrow dU = dH - P dV - V dP = T ds - P dV$$

$$\begin{cases} T ds = dH - V dP \\ T ds = dh - v dp \end{cases}$$

تغییر انتروپی بین دو حالت در شرایط گاز ایده آل:

$$Pv = RT, du = c_v dT, dh = c_p dT$$

$$T ds = du + P dv = c_v dT + RT \frac{dv}{v} \rightarrow ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

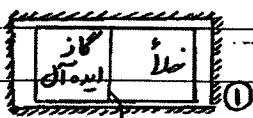
$$\int_1^2 ds = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

این رابطه به نوع فرآیند بستگی ندارد.

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

ازیرا، انتروپی تنها تابع حالت است.

مثال: گاز ایده آل طی یک فرآیند انبساط آزاد از حالتی در حالیکه در دمای  $T_1$  و حجم  $V_1$  قرار دارد به حالتی در دمای  $T_2$  و حجم  $V_2$  می‌رسد. تغییر انتروپی در این فرآیند را محاسبه کنید.



قانون اول:  $Q_2 = 0, W_2 = U_2 - U_1, U_2 = U_1$   
گاز ایده آل:  $T_2 = T_1$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + s_g \rightarrow s_g = s_2 - s_1 = m(s_2 - s_1)$$

با توجه به آنکه فرآیند انجام شده برگشت ناپذیر است، دولی با هم می‌توان  
برای محاسبه تغییر انتروپی از رابطه بالا استفاده کرد.

$$s_g = s_2 - s_1 = m(s_2 - s_1) = m \left[ c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \right]$$

$$\Rightarrow s_g = m R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$T ds = dh - v dp = c_p dT - RT \frac{dp}{p} \rightarrow ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$\rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

برای گاز کبک:  $h = h(T)$

$$h_i = h_e \rightarrow T_i = T_e$$

اینجمله  $c_p = \text{ثابت}$

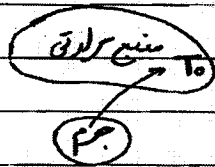
$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

تغییر انتروپی برای مایعات و جامدات:

$$T ds = du + P dv \rightarrow du = c dT \rightarrow T ds = c dT \rightarrow ds = c \frac{dT}{T} \quad (v \ll 1)$$

اینجمله  $c = \text{ثابت}$

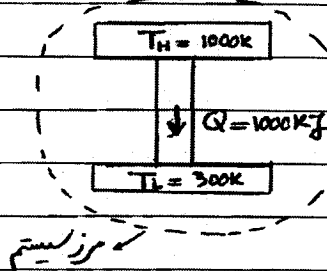
$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$



تغییر انتروپی برای منبع های حرارتی

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_1^2 \frac{\delta q}{T_0} \rightarrow s_2 - s_1 = -\frac{Q_{sys}}{T_0}$$

می توان از رابطه  $s_2 - s_1 = mc \ln \frac{T_2}{T_1}$  استفاده کرد.



مسئله کل مجموع به عنوان سیستم

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} + S_g$$

$$\Delta S = \Delta S_{TH} + \Delta S_{TL} = -\frac{Q}{T_H} + \frac{Q}{T_L} = Q \left( \frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right)$$

$$\Delta S = 1000 \left( \frac{1}{300} - \frac{1}{1000} \right) = 2.33 \frac{kJ}{K}$$

این تغییر انتروپی در داخل منبع های گرما اتفاق نمی افتد.  
 \* تولید انتروپی همواره همراه است با از دست رفتن کار با استفاده از یک موتور حرارتی در این سیستم می توان تا 700KJ کار تولید کرد.  
 \* افزایش انتروپی ناشی از انتقال حرارت مثبت و برگشت ناپذیری هاست.

رابطه بین P و T عمدتاً برای گاز ایده آل روی نمودار T-s:

رابطه بین P و T در یک فرآیند انتروپیک برای گاز ایده آل:

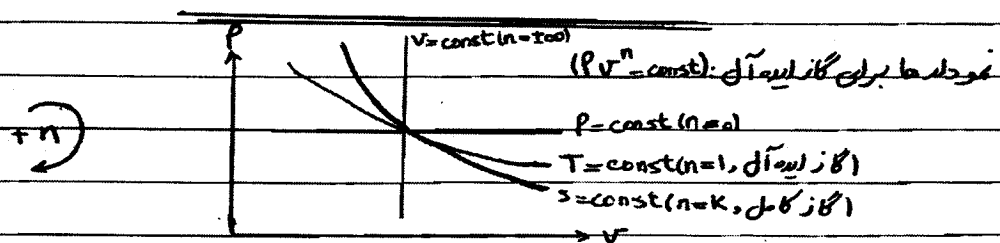
$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_2}{P_1} = 0 \rightarrow \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{c_p} = \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^R \rightarrow \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{c_p} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^R$$

$$\rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad R = c_p - c_v \quad \frac{R}{c_p} = \frac{c_p - c_v}{c_p} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \Rightarrow TP^{\frac{1-K}{K}} = \text{const (s=cte, jakik)} \quad (I)$$

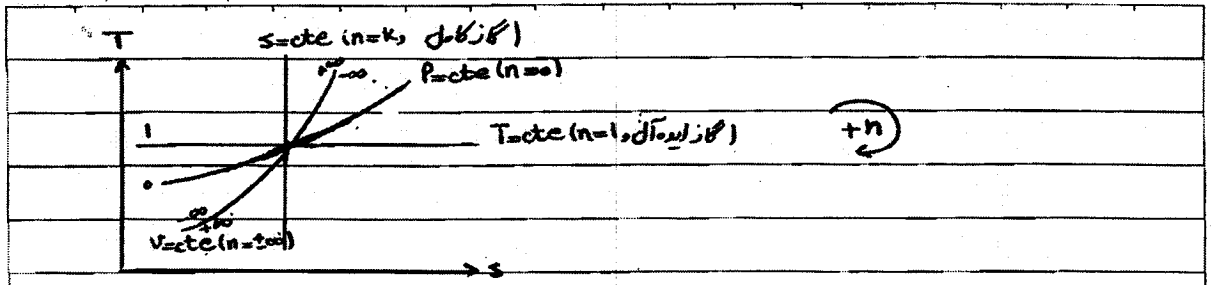
$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} = 0 \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-K}$$

$$\rightarrow TV^{K-1} = \text{const (s=cte, jakik)} \quad (II)$$

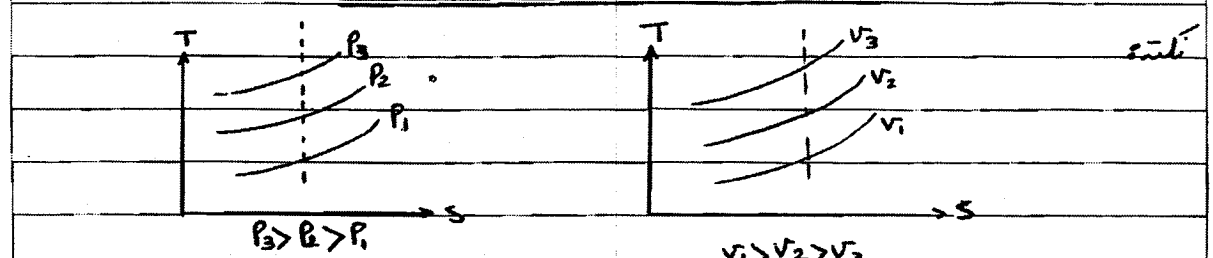
$$(I), (II) \rightarrow PV^K = \text{const (s=cte, jakik)}$$



۴۴

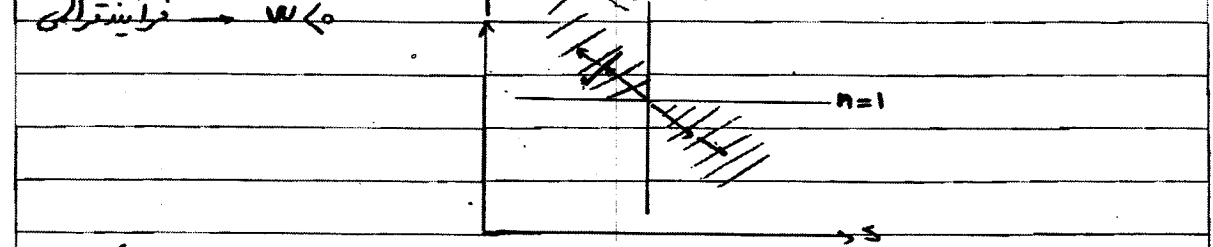


$P=cste \cdot Tds = dh - vdp$ $Tds _p = dh _p \quad c_p = \frac{dh}{dT} _p$ $\frac{\partial T}{\partial s} _p = \frac{T}{c_p} > 0$	$v=cste \cdot Tds = du + Pdv$ $Tds _v = du _v \quad c_v = \frac{du}{dT} _v$ $\frac{\partial T}{\partial s} _v = \frac{T}{c_v} > 0$
$c_p > c_v$	



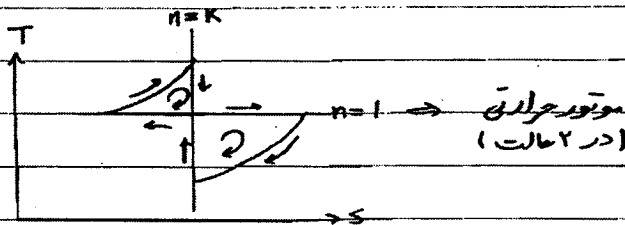
$Tds = dh - vdp = c_p dT - vdp$ $s=cste \rightarrow 0 = c_p dT _s - vdp _s$ $\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial p} _s = \frac{v}{c_p} > 0$ (فشار و دما هم‌راستا)	$Tds = du + Pdv = c_v dT + Pdv$ $s=cste \rightarrow 0 = c_v dT _s + Pdv _s$ $\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial v} _s = -\frac{P}{c_v} < 0$ (دما و حجم غیر هم‌راستا)
---	---

مثال: یک گاز کفلی با نسبت گرماها ویژه  $\gamma = 1.3$  یک فرآیند یکنواخت تراکم با  $n=1.2$  را انجام می‌دهد. دلیل فرآیند است کار و انتقال حرارت را نسبت آورده و نمودار  $T-s$  آن را رسم کنید.

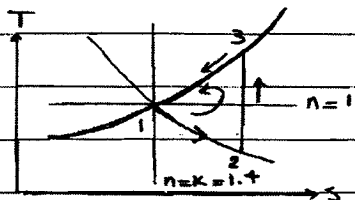


تراکم  $\rightarrow P_2 > P_1 \rightarrow s_2 < s_1 \rightarrow Q < 0$

مثالی که یک سیکل ترمودینامیکی که اجزای آن همه یک گاز کامل است متشکل از سه فرآیند به ترتیب دما ثابت، فشار ثابت و ایزنتروپیک می باشد. تعیین کنید که این سیکل که آیا یک موتور حرارتی است یا یک یخچال حرارتی؟



مثالی که گاز ایده آل یک فرآیند ترمودینامیکی با  $n=1.4$  را اجزای کند که طی آن حالت اولیه  $T$  و  $P$  به ترتیب  $1000K$  و  $500kPa$  و فشار پس از فرآیند  $1$  مقدار اولیه می گردد. سپس یک فرآیند ایزنتروپیک و پس از آن یک فرآیند حجم ثابت را اجرا کرده و به حالت اولیه بازمی گردد. برای این گاز ایده آل  $\gamma = 1.4$  و  $c_p = 1 \frac{kJ}{kgK}$  و  $M = 29 \frac{kg}{kmol}$  تعیین کنید دمای ماکزیمم سیکل چقدر است؟ این سیکل موتور حرارتی است یا یک یخچال حرارتی؟ در صورت یک یخچال برآیند و در صورت موتور نشانان حرارتی و رانندگی آن را بدست آورید.



سیکل یخچال حرارتی

$$\beta = \frac{q_L}{w_{net}}$$

$$w_{net} = -w_2 + w_3 + w_1$$

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

$$w_2 = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$$

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

$$w_3 = \frac{P_3 v_3 - P_2 v_2}{1-k} = \frac{R(T_3 - T_2)}{1-k}$$

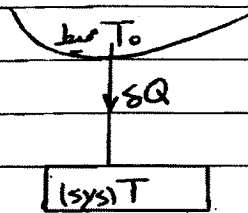
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (s_3 = s_2) \\ \frac{T_3}{T_1} = \frac{P_3}{P_1} \quad (v_3 = v_1) \end{array} \right. \rightarrow T_3 = \checkmark$$

$Q_1 = Q_2 \rightarrow 1^{st} \text{ law: } Q_2 - w_2 = u_2 - u_1 \rightarrow Q_2 = c_v (T_2 - T_1) + w_2$

اصل افزایش آنتروپی

$$\Delta S_{universe} = \Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr} \geq 0$$

اثبات



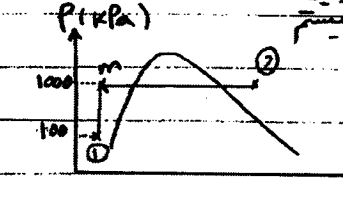
$$dS_{sys} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

$$dS_{surr} = -\frac{\delta Q}{T_0}$$

$$dS_{net} = dS_{sys} + dS_{surr} \geq \delta Q \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T > T_0 \Rightarrow ( ) < 0, \delta Q < 0 \Rightarrow dS_{net} > 0 \\ T < T_0 \Rightarrow ( ) > 0, \delta Q > 0 \Rightarrow dS_{net} > 0 \end{array} \right.$$

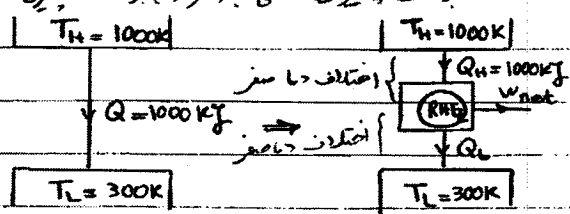
مثال 5:  $\Delta S_{net} = ?$   $v_2 = ?$   $w_2 = ?$   $Q_2 = ?$   
مکان و اول: 1-2  
 $Q_2 - W_2 = v_2 - v_1$   
 $w_2 = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{m} + m w_2 = m P_2 (v_2 - v_1) = m P_2 (v_2 - v_1)$   
برگشت ناپذیری در هر سیستم  
 $Q_2 = m P_2 (v_2 - v_1) + m(u_2 - u_1)$   
 $u_1 = u_f|_{20^\circ C}$   $v_1 = v_f|_{20^\circ C}$   
 $u_2 = u(300^\circ C, 1000 \text{ kPa})$   $v_2 = v(300^\circ C, 1000 \text{ kPa})$   
 $v_2 = m v_2$



$$\Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_H = m(s_2 - s_1) - \frac{Q_2}{(K) \cdot T}$$

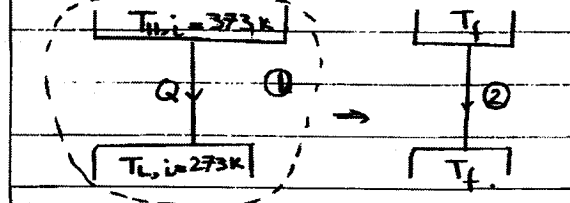
برداشت لئانول افزایش انترپی

$\Delta S_{isolated-system} \geq 0$   
 $((\Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_n)) \geq 0$   
موانع و انتروپی برقرار  $\rightarrow$  (مفتم که تمام فرآیندها برگشت پذیر باشند)  
 $\Delta S_{isolated-sys} = 0$   
اینست.



مثال 6: (تمام فرآیندها برگشت پذیر)  $\Delta S_{net} = 0$   
 $\Delta S_{net} = \Delta S_H + \Delta S_C + \Delta S_{RHE} = 0$   
یک فرآیند برگشت پذیر است. بنابراین  $Q_H$  و  $Q_C$  یک فرآیند برگشت پذیر است.  
 $\Delta S_{net} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} = 0$   
 $\frac{Q_C}{T_C} = \frac{Q_H}{T_H} \rightarrow Q_C = \frac{T_C}{T_H} Q_H$

مثال 7: 100 kg آب در دمای  $100^\circ C$  و 100 kg آب در دمای  $5^\circ C$  در دوطرف جداگانه موجود می باشد.  
به دلیل یک سیم رسانای حرارت، این دوطرف را به یکدیگر تانس حرارتی و در هم تبادل حرارت آنگاه  
صورت می گیرد تا دمای دوطرف به هم یک برابر شود. دمای تعادل نهایی را بیست ثانیه و تعیین کنید مقدار حرارت  
یعنی این دوطرف تبادل شده است؟



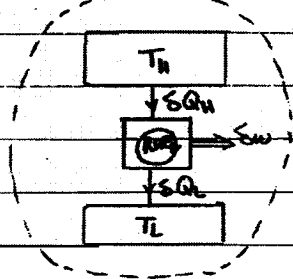
$$T_f = 50^\circ C$$

$\Delta U_{isolated-sys} = 0 \rightarrow \Delta U_H + \Delta U_C = 0$   
 $Q = (\Delta U)_C = mc(T_f - T_{C,i})$   
 $Q = 100 \times 4.12(50 - 5) = 21 \text{ MJ}$

فرآیند برگشت ناپذیر

مثال ۴ اگر فرآیند انتقال حرارت کاملاً برعکس میسر و انتقال حرارت از طریق یک موتور برگشت پذیر

انجام شود، دمای هر یک از دو منبع در هنگام انکار افتادن موتور و کار خالص تولیدی را محاسبه کنید.



$\Delta S_{net} = 0$  (All processes are reversible)

$\Delta S_H + \Delta S_L + \Delta S_{net} = 0$   
(executes a cycle)

$(mc)_H \ln \frac{T_f}{T_{i,H}} + (mc)_L \ln \frac{T_f}{T_{i,L}} = 0$   
 $\ln \frac{T_f}{T_{i,H}} = - \ln \frac{T_f}{T_{i,L}} \rightarrow \frac{T_f}{T_{i,H}} = \frac{T_{i,L}}{T_f} \rightarrow T_f = \sqrt{T_{i,H} T_{i,L}}$

در نتیجه

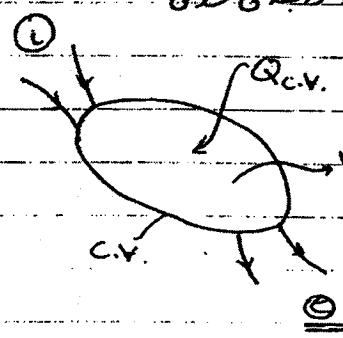
$Q_H = \Delta U_H = (mc)_H (T_{i,H} - T_f)$   
 $Q_L = \Delta U_L = (mc)_L (T_f - T_{i,L})$   
 $\Rightarrow W_{net} = Q_H - Q_L = (mc) [T_{i,H} + T_{i,L} - 2T_f]$

$\Rightarrow W_{net} = (100 \times 4.2) [373 + 273 - 2 \times 319] = 3360 \text{ kJ} = 0.93 \text{ kWh}$

### قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل

$$s_2 - s_1 = \int \frac{\delta Q}{T} + s_g \rightarrow ds = \frac{\delta Q}{T} + \delta s_g$$

رابطه ی ساده  $\rightarrow \frac{ds}{dt} = \frac{Q}{T} + \dot{s}_g$



عامل اصطکاک میان، ویسکوزیته است که عامل برگشت ناپذیری است.

$$\left. \frac{ds}{dt} \right|_{c.v.} = \sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i + \dot{s}_g$$

شکل کلی قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل:

$$\left. \frac{ds}{dt} \right|_{c.v.} + \sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i = \sum_{c.s.} \frac{Q}{T} + \dot{s}_g$$

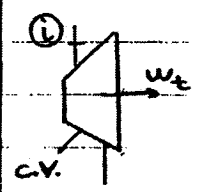
قانون دوم ترمودینامیک برای وسایل که انتقال حرارت برای آنها ناچیز است و شرایط SSSF دارند:

$Q_{c.v.} = 0$  ،  $\left. \frac{ds}{dt} \right|_{c.v.} = 0$   
 2<sup>nd</sup> law:  $\sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i = \dot{s}_g$

یک ورودی و یک خروجی  $\rightarrow m_e = m_i = \dot{m} \Rightarrow \dot{m}(s_e - s_i) = \dot{s}_g$

توربین، کمپرسور، پمپ، نازل، دیفیوزر، شیر انبساط

مثال: یک توربین آدیاباتیکی را در نظر بگیرید که در آن هوا با دمای ۱۰۰۰K و فشار ۱MPa وارد توربین شده و فشار ۱۰۰kPa از آن خارج می شود. با فرض برگشت پذیر بودن فرآیند، کار تولیدی توربین به ازای هر کیلوگرم هوای ورودی تعیین کنید. (هوا را گاز ایده آل فرض کنید.)



1<sup>st</sup> law:  $iW_e = h_i - h_e = c_p (T_i - T_e) = c_p T_i \left(1 - \frac{T_e}{T_i}\right)$

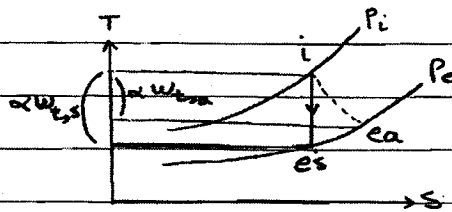
2<sup>nd</sup> law:  $s_e = s_i$  ( $\dot{s}_g = 0$ )

$\Rightarrow iW_e = c_p T_i \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]$  (نسبت فشار  $\equiv r_{p,t}$ )

$\Rightarrow iW_e = c_p T_i \left[1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right]$

$\rightarrow iW_e = 1.004 \times 1000 \left[1 - \left(\frac{1000}{100}\right)^{\frac{1-1.4}{1.4}}\right] = 483.98 \text{ kJ/kg}$



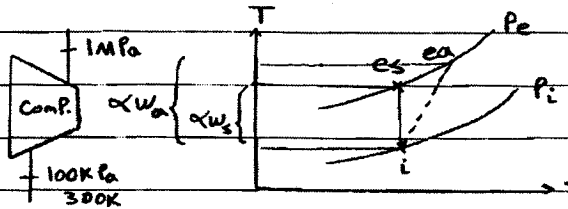


نکته: از بین تمامی توربین‌های آدیاباتیکی که شرایط درونی و نسبت فشار یکسان دارند کار تولیدی توربین برگشت پذیر بیشینه است.

رانندگی آیزنتروپیک  $\eta_{s,t} \equiv \frac{w_a}{w_s}$

رانندگی آیزنتروپیک برای کمپرسور

مثال: هوا با شرایط 100kPa و 300K و لاندیک کمپرسور با رانندگی آیزنتروپیک 85% به فشار 1MPa خارج می‌شود. دمای خروجی و کار مصرفی کمپرسور را بدست آورید. (برای هر کیلوگرم هوا ورودی)



$\eta_{s,c} \equiv \frac{w_s}{w_a} = \eta_{s,p}$   
 رانندگی آیزنتروپیک  
 $r_{p,c} \equiv \frac{P_e}{P_i}$

قانون اول برای موتور برگشت

$w_s = w_e = h_i - h_{e,s} = c_p(T_i - T_{e,s}) = c_p T_i \left(1 - \frac{T_{e,s}}{T_i}\right) = c_p T_i \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$

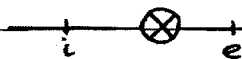
$\Rightarrow w_e = c_p T_i \left(1 - r_p^{\frac{k-1}{k}}\right) \Rightarrow \frac{1}{\eta_{s,c}} c_p T_i \left[1 - r_p^{\frac{k-1}{k}}\right] = w_a$

1<sup>st</sup> law (موتور واقعی)  $\Rightarrow w_e = h_i - h_{e,a} = c_p(T_i - T_{e,a})$

$\Rightarrow T_{e,a} = T_i - \frac{w_e}{c_p} \Rightarrow T_{e,a} = T_i - \frac{T_i}{\eta_{s,c}} \left[1 - r_p^{\frac{k-1}{k}}\right]$

\*  $s_{e,a} - s_i = c_p \ln \frac{T_{e,a}}{T_i} - R \ln \frac{P_e}{P_i}$

شرایط



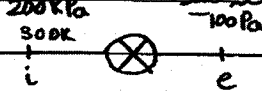
یک پروسه کاملاً برگشت پذیر است.

1<sup>st</sup> law:  $h_e = h_i$

2<sup>nd</sup> law:  $m(s_e - s_i) = \dot{S}_g$

\* زیادترین فشار در جهت معکوس اتفاق می‌افتد دوم ترمودینامیک است نه قانون اول.

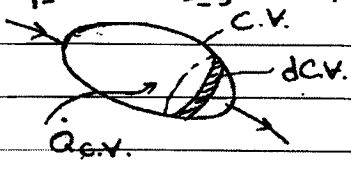
مثال: هوا با فشار 200 kPa و دما 300K از یک ترانسپانسی عبور می کند. در صورتی که فشار به 100 kPa از دسترس خارج برسد، انرژی تولیدی در این فرآیند را محاسبه کنید. (به ازای هر کیلوگرم هوای ورودی)  $T_i = T_e$  1st law:  $h_i = h_e$



2nd law:  $m(s_e - s_i) = \dot{S}_g$   $\dot{S}_g = s_e - s_i = c_p \ln \frac{T_e}{T_i} - R \ln \frac{P_e}{P_i}$

$\dot{S}_g = R \ln \frac{P_e}{P_i} \Rightarrow \dot{S}_g = 0.287 \ln \frac{100}{200} = -0.1989 \text{ kJ/kg K}$

فرآیندی که در قالب SSSF، برگشت ناپذیری واضح ندارند. (برگشت ناپذیری درونی ندارند)



1st law:  $Q_{c.v.} - W_{c.v.} = m(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2) - m(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1)$

mass:  $m_e = m_i = m$

2nd law:  $m(s_e - s_i) = \sum \frac{Q}{T} + \dot{S}_g$

1st law (d.c.v.):  $\delta q_{c.v.} - \delta w_{c.v.} = dh + d(\frac{V^2}{2}) + d(gz)$

2nd law (d.c.v.):  $ds = \frac{\delta q_{c.v.}}{T} + \delta s_g \Rightarrow \delta q_{c.v.} = T ds$

از طرف:  $T ds = dh - v dp$

\*  $dh - v dp - \delta w_{c.v.} = dh + d(\frac{V^2}{2}) + d(gz) \Rightarrow \delta w_{c.v.} = -v dp - d(\frac{V^2}{2}) - d(gz)$

$\Rightarrow w_{c.v.} = \int_i^e v dp - (\frac{V_e^2}{2} - \frac{V_i^2}{2}) - g(z_e - z_i)$  (I)

با منفی کردن اثرات  $ke$  و  $pe$ :

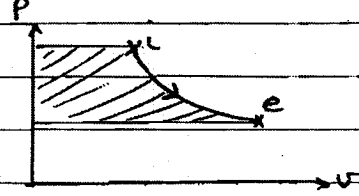
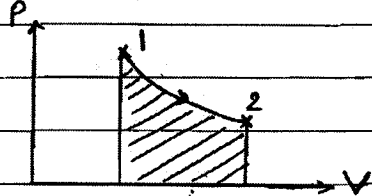
$w_{c.v.} = \int_i^e v dp$  ,  $w_{c.v.} = h_i - h_e$

\* آید برگشت ناپذیری باشد. \*  
مرتبط از انرژی SSSF  
جنبشی و پتانسیل

\* آید برگشت ناپذیری باشد. \*  
مرتبط از انرژی SSSF  
انرژی جنبشی و پتانسیل

$w_2 = \int_1^2 P dV$  (تساوی)

$w_e = - \int_i^e v dP$  (برگشت پذیر)



$w_e = -v(P_e - P_i) = v(P_i - P_e)$

$w_p = v \Delta P$

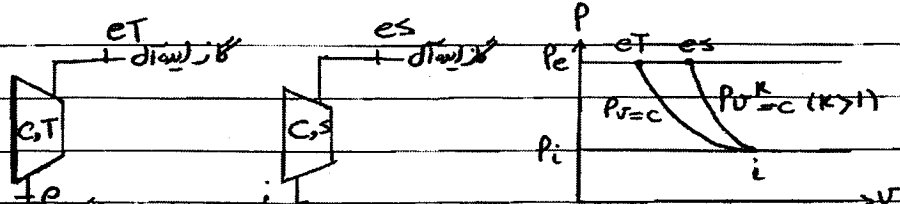
کار مفید  
سیال تراکم ناپذیر

اگر مسیر فرآیند تراکم ناپذیر مطابق یک فرآیند پلی تروپیک باشد:

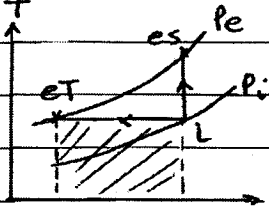
$Pv^n = P_i v_i^n \rightarrow v = (P_i/P)^{1/n} v_i$   
 $w_e = - \int_i^e v dP = - v_i P_i^{1/n} \int_i^e P^{-1/n} dP$

$n \neq 1 \rightarrow w_e = \frac{n}{1-n} P_e v_e - P_i v_i$   
 $n = 1 \rightarrow w_e = P_e v_e \ln \frac{v_e}{v_i}$

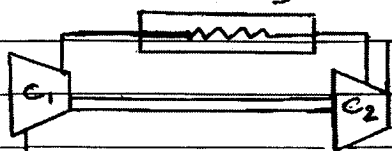
کار انجام شده در یک فرآیند پلی تروپیک  
برگشت پذیر برای حجم کنترل



کار مفید کمپرسور همواره کمتر است.  
 «کمپرسور برگشت پذیر آیزنتروپیک» کمپرسور همواره  
 برگشت پذیر



\* کمپرسور همواره وجود ندارد المینوس می تواند بی آن نزدیک باشد

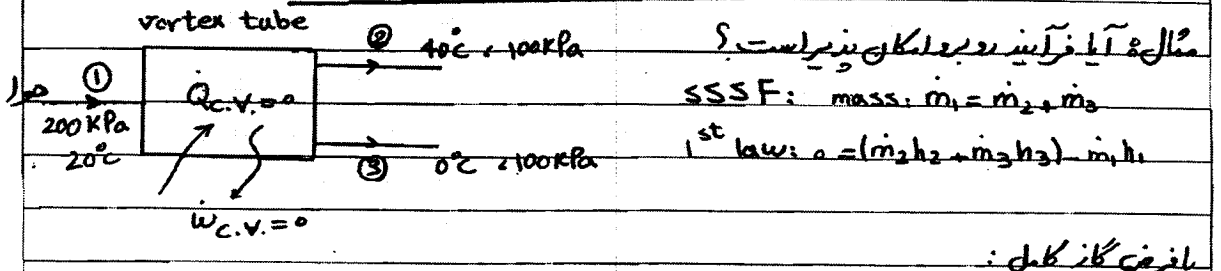


\* توجه شود که بین تمام کمپرسورهای آدیاباتیک که شرایط ورودی و نسبت فشار یکسان دارند، کار مفید کمپرسور برگشت پذیر از همه کمتر است. اما در این مثال نشان دادیم که کار کمپرسور همواره برگشت پذیر (غیر آدیاباتیک) از کمپرسور آدیاباتیک برگشت پذیر کمتر است.

$$\int_1^2 w_{c.v.} = \int_1^2 v dp = 0 \rightarrow P = \text{cte due to constant pressure}$$

$$\textcircled{1} \rightarrow 0 = -v dp - d\left(\frac{V^2}{2}\right) - d(gz) \quad v = \text{const} \rightarrow P_1 v_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = P_2 v_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

معادله برنولی (در صورتی که برگشت ناپذیری نداشته باشیم)  
 یا استگی انرژی مکانیکی



با فرض گاز کامل:  

$$0 = m_2 c_p T_2 + m_3 c_p T_3 - m_1 c_p T_1 \rightarrow 0 = m_2 T_2 + (m_2 + m_3) T_3 - m_1 T_1$$

$$\Rightarrow 0 = m_2 (T_2 - T_3) + m_1 (T_3 - T_1) \Rightarrow \frac{m_2}{m_1} = \frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3} = 0.5$$

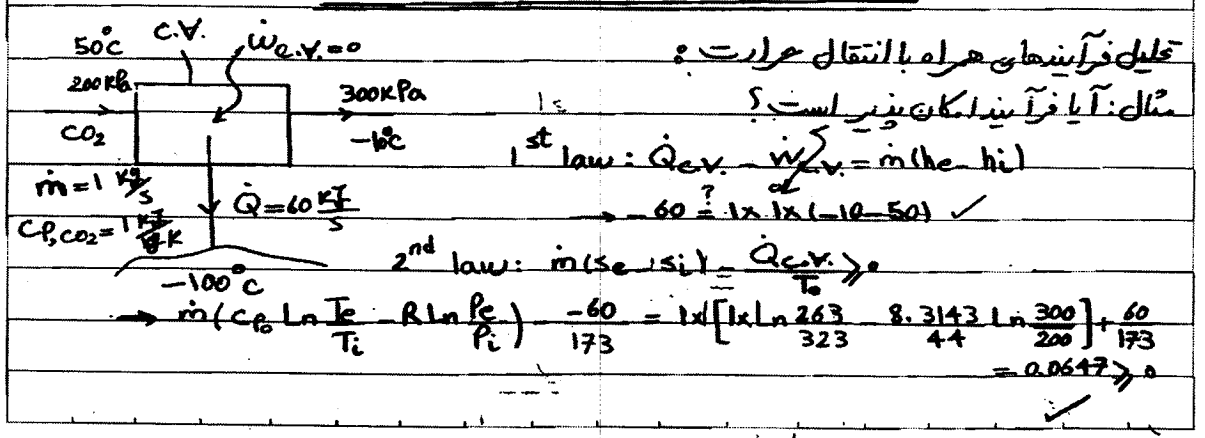
2<sup>nd</sup> law:  $m_3 s_3 + m_2 s_2 - m_1 s_1 = \dot{S}_g \gg 0$   

$$\Rightarrow m_3 (s_3 - s_1) + m_2 (s_2 - s_1) \gg 0$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 1.004 \ln \frac{313.15}{293.15} - 0.287 \ln \frac{100}{200} = 0.265 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

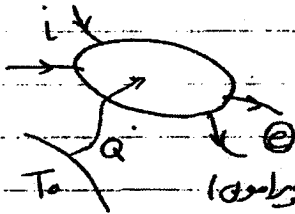
$$s_3 - s_1 = c_p \ln \frac{T_3}{T_1} - R \ln \frac{P_3}{P_1} = 1.004 \ln \frac{273.15}{293.15} - 0.287 \ln \frac{100}{200} = 0.128 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\textcircled{*} 0.5(0.128) + 0.5(0.265) = 0.1965 \gg 0 \rightarrow \text{ویراب است}$$



or

Principle of increase of entropy for a C.V. :



$$\frac{dS}{dt}|_{C.V.} = \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e + \sum_{C.S.} \frac{Q}{T} + S_g$$

(مجموعه دیتاها را در نظر بگیرید)  $\frac{dS}{dt}|_{surr.} = \sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i - \frac{Q_{C.V.}}{T_0}$   $\rightarrow Q_{C.V.} = \sum_{C.S.} Q$

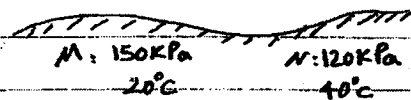
$$\frac{dS_{net}}{dt} \equiv \frac{dS}{dt}|_{C.V.} + \frac{dS}{dt}|_{surr.} = S_g + \sum_{C.S.} \frac{Q}{T} - \sum_{C.S.} \frac{Q}{T_0} \geq 0$$

$$\sum_{C.S.} Q \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

\* SSSF پیلاب  $\rightarrow \frac{dS}{dt}|_{C.V.} = 0 \rightarrow \frac{dS}{dt}|_{surr.} = \sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i - \frac{Q_{C.V.}}{T_0} \geq 0$

\* US-VF پیلاب  $\rightarrow \underbrace{(m_2 s_2 - m_1 s_1)}_{\Delta S_{C.V.}} + \underbrace{\sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i - \frac{Q_{C.V.}}{T_0}}_{\Delta S_{surr.}} \geq 0$

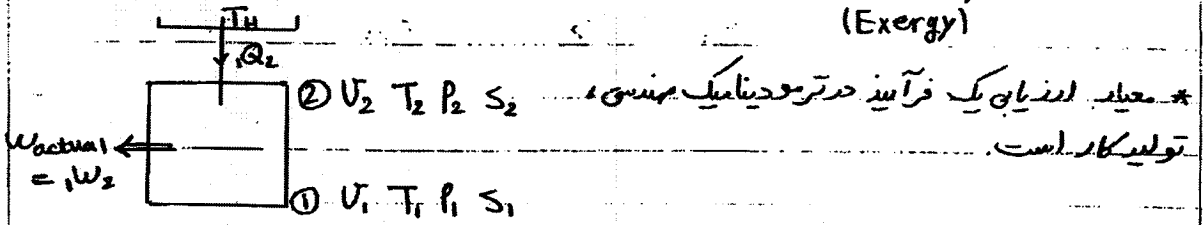
مثال: جهت جریان به کدام است؟



باید انالیز کنیم بنیاد بریم یک جهت فرض میکنیم  
اگر  $\Delta S < 0$  جهت برعکس است.

فصل ۱۵ : بازگشت ناپذیری و قابلیت کاردهی

Reversible work, Irreversibility, Availability (Exergy)

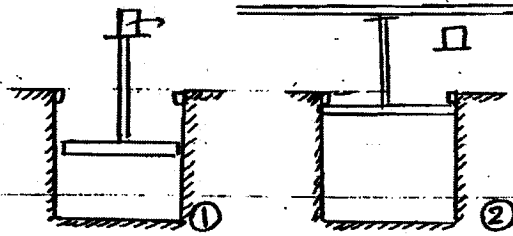


\* معیار ارزیابی یک فرآیند در ترمودینامیک مهندسی، تولید کار است.

تبدیل فرآیند ایده آل:

① حالت ابتدایی و انتهای باید همان حالت ابتدایی و انتهای سیستم واقعی باشند.

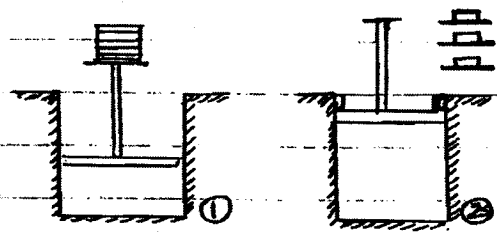
② همه فرآیندها باید به صورت برگشت پذیر انجام شوند.



مثال:  $Q_2 - W_2 = \Delta U \rightarrow \Delta U = 0$

$\rightarrow U = U_2$

بفرض گاز ایده آل:  $T_2 = T_1$



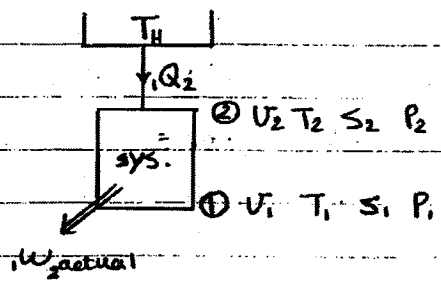
فرآیند ایده آل:

\* با انجام این فرآیند عامل برگشت ناپذیری را حذف کرده ایم. اما با این وجود دقیقاً از همان حالت نهایی فرآیند برگشت ناپذیر عبور نکردیم.

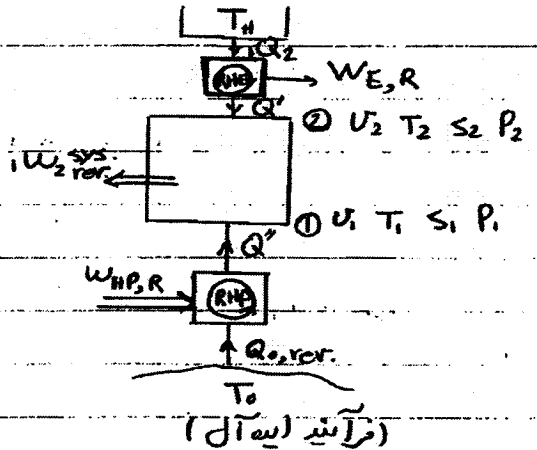
قرار داده با دادن یک تبادل حرارت مجازی، سیستم برگشت پذیر را به حالت نهایی سیستم برگشت ناپذیر می‌رسانیم. انتقال حرارت از محیط توسط یک موتور حرارتی یا پمپ حرارتی برگشت پذیر انجام می‌شود.

فرآیند ایده آل یک فرآیند کاملاً برگشت پذیر بین حالت‌های ابتدایی و انتهای فرآیند واقعی صورت گیرد جهت اینکه مسیر ترمودینامیکی سیستم در فرآیند ایده آل از حالت نهایی فرآیند واقعی عبور کند. یک تبادل حرارت برگشت پذیر با محیط (ایرپون) در دما  $T_0$  از طریق یک موتور یا پمپ حرارتی برگشت پذیر به فرآیند آرمانی اضافه می‌شود.

۵۵



(فرآیند واقعی)



(فرآیند ایده آل)

$$W_{2,rev} = W_{E,R} + W_{2,rev}^{sys} - W_{HP,R}$$

قانون اول برای سیستم  $\rightarrow W_{2,rev}^{sys} = Q' + Q'' - (U_2 - U_1)$

قانون اول برای RHE  $\rightarrow W_{E,R} = Q_2 - Q'$

قانون اول برای RHP  $\rightarrow W_{HP,R} = Q'' - Q_{0,rev}$

$$W_{2,rev} = \underbrace{Q' + Q''}_{W_{2,rev}^{sys}} - (U_2 - U_1) + \underbrace{(Q_2 - Q')}_{W_{E,R}} - \underbrace{(Q'' - Q_{0,rev})}_{W_{HP,R}}$$

$$\Rightarrow W_{2,rev} = U_1 - U_2 + Q_2 + Q_{0,rev} \quad (I)$$

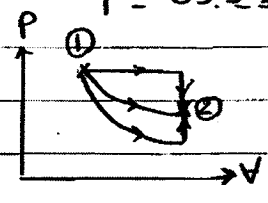
قانون دوم: مولزندی انتروپی برقرار است.

$$\Delta S_{net} = 0 \rightarrow \Delta S_H + \Delta S_{RHE} + \Delta S_{sys} + \Delta S_{RHP} + \Delta S_{T_0} = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{Q_2}{T_H} + (S_2 - S_1)_{sys} - \frac{Q_{0,rev}}{T_0} = 0 \rightarrow Q_{0,rev} = T_0 (S_2 - S_1) - Q_2 \frac{T_0}{T_H} \quad (II)$$

$$(I), (II) \rightarrow W_{2,rev} = (U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) + Q_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

مستند از نمودار اجزای فرآیند برگشت پذیر برای سیستم



$$W_2^{rev} - W_2^{actual} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + Q_2 \left[ 1 - \frac{T_0}{T_H} \right] - \left[ \frac{Q_2}{T_H} (U_1 - U_2) \right]$$

$$\rightarrow W_2^{rev} - W_2^{actual} = T_0(S_2 - S_1) - Q_2 \left( \frac{T_0}{T_H} \right) = T_0 \left( \underbrace{S_2 - S_1}_{\Delta S_{sys.}} - \underbrace{\frac{Q_2}{T_H}}_{\Delta S_H} \right) \gg 0$$

$$\rightarrow W_2^{rev} \gg W_2^{actual}$$

حد اکثر کار مفید  
حد اکثر کار تولیدی

$$\Delta S_{net} > 0$$

$$I_2 = W_2^{rev} - W_2^{actual} \equiv \text{Irreversibility} = T_0 \Delta S_{net}$$

\* برای محاسبه اختلاف انتروپی، اگر  $c_p$  ثابت نباشد: (گاز ایده آل، نه گاز کامل)  
 $T ds = dh - v dp \rightarrow ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T} dp = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dp = c_p \frac{dT}{T} - \frac{R}{P} dp$

$$\Rightarrow s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad s_T^\circ = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT \rightarrow s_2 - s_1 = s_{T_2}^\circ - s_{T_1}^\circ - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{R}{P} dp \quad ds=0 \rightarrow \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT = \int_{P_1}^{P_2} \frac{R}{P} dp \rightarrow s_{T_2}^\circ - s_{T_1}^\circ = R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

هوای  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ MPa}, 1000 \text{ K} \\ 100 \text{ kPa}, T_2 = ? \end{array} \right. \quad s_1 = s_2$

مثال

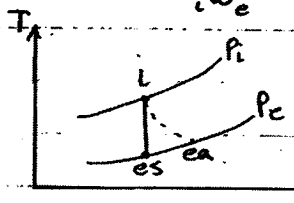
$$s_{T_2}^\circ = s_{T_1}^\circ + R \ln \frac{P_2}{P_1} = 8.13493 + 0.287 \ln \frac{100}{1000} = 7.474 \text{ kJ/kg K}$$

$s_T^\circ$	T (K)
7.46642	540
7.474	T
7.50422	560

$T = 544 \text{ K}$

$$\eta_{2nd. law} \equiv \frac{iW_e^{actual}}{iW_e^{rev}}$$

راندن قانون دوم ترمودینامیک:



$$\eta_{s,t} = \frac{iW_{ea}}{iW_{es}}$$

$$\eta_{2nd. law} = \frac{iW_{ea}}{iW_{es}} \rightarrow \text{برای دستگاه در حال کار}$$

\* فرآیند در قالب سیستم انجام شده است:

$$W_2^{rev} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + Q_2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

دای منبجی که با سیستم در حال تبادل حرارت است (بسیار گرم، بسیار سرد)



۵۷

فرآیند حجم ثابت و SSSF

$$iW_e^{rev} = (\sum_i m_i h_i - \sum_e m_e h_e) - T_0 (\sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e) + \dot{Q}_{c.v.} (1 - \frac{T_0}{T_H})$$

توان برگشت پذیر

$$iW_e = iW_e^{rev} - iW_e^{actual} = T_0 [\sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i] - T_0 \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T_H}$$

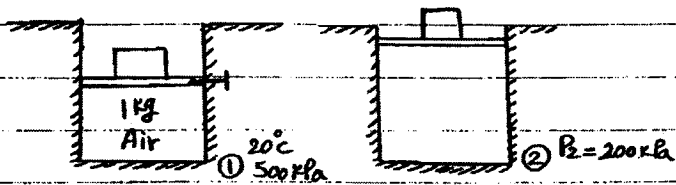
نرخ تولید برگشت پذیر

فرآیند US-VF

$$iW_2^{rev} = (U_1 - U_2)_{c.v.} + (\sum_i m_i h_i - \sum_e m_e h_e) - T_0 (s_1 - s_2)_{c.v.} - T_0 (\sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e) + \dot{Q}_{c.v.} (1 - \frac{T_0}{T_H})$$

$$iI_2 = iW_2^{rev} - iW_2^{actual} = T_0 (s_2 - s_1)_{c.v.} + T_0 (\sum_e m_e s_e - \sum_i m_i s_i) - T_0 \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T_H}$$

مثال: هوا در 20°C و 500 kPa در داخل یک مجموعه سیلندر و پیستون با یک جرم مشخص مطابق شکل با یکدیگر شده است، موجود می باشد. این پیستون و پیستون دیگری هم می توانند فشاری معادل 200 kPa را روی هوا اعمال کنند. رابریون کسینوم و واچاز من دهیم یک وضعیت تعادلی جدید برقرار شود. کار برگشت پذیر و کار واقعی را بیست آدرس.



$$iW_2^{actual} = mg \cdot h = P_2 A \cdot \frac{\Delta V}{A} = P_2 \Delta V$$

1st law:  $\dot{Q}_2 = iW_2 = U_2 - U_1 \rightarrow P_2 (V_2 - V_1) = U_2 - U_1 \rightarrow H_2 = U_1 + P_2 V_1$

$$\rightarrow m c_p T_2 = m c_v T_1 + \frac{P_2 m R T_1}{P_1} \rightarrow T_2 = \frac{c_v}{c_p} T_1 + \frac{P_2}{P_1} \frac{R}{c_p} T_1$$

$$\rightarrow T_2 = T_1 \left[ \frac{1}{k} + \frac{P_2}{P_1} \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \right]$$

$$iW_2^{rev} = U_1 - U_2 - T_0 (s_1 - s_2) = m c_v (T_1 - T_2) - T_0 m \left[ c_p \ln \frac{T_1}{T_2} - R \ln \frac{P_1}{P_2} \right]$$

$$iW_2^{actual} = P_2 (V_2 - V_1) = P_2 \left[ \frac{m R T_2}{P_2} - \frac{m R T_1}{P_1} \right] = P_2 m R \left[ \frac{T_2}{P_2} - \frac{T_1}{P_1} \right]$$

اکسرژی و قابلیت تولید کار ماده به واسطه حالت ترمودینامیکی که ماده در آن قرار دارد.  
 حالت مرده s حالت ترمودینامیکی است که دمای ماده برابر دمای محیط و فشار آن برابر فشار محیط است  
 و بنابراین ماده پتانسیلی نسبت به محیط ندارد.

اکسرژی مقدار انرژی است که می توان تولید کرد برای آنکه ماده را از حالت ترمودینامیکی که در آن است  
 به شرایط حالت مرده برسانیم.

$$\phi = (V - V_0) - T_0(S - S_0) - P_0(V_0 - V)$$

کار در مقابل فشار محیط

اکسرژی در قالب SSSF انجام شود :

$$\dot{\psi} = \dot{m}(h - h_0) - \dot{m}T_0(S - S_0)$$

www.vepub.com

Publish Your Mind