דף נוסחאות – תרמודינמיקה - 084213

המרת יחידות

מימד	מערכת מטרית			מערכת בריטית	
	MKS הנדסית	MKS מוחלטת	CGS מוחלטת	הנדסית	מוחלטת
m מסה	$kg_f \cdot \frac{s^2}{m}$	kg	gr	slug	lb_m
F כוח	kg_f	$N = kg\frac{m}{s^2}$	dyne	lb_f	$poundal$
L אורך	m	m	cm	ft	ft
t זמן	s	s	s	s	s
P לחץ	kg_f/m^2	Pa	$dyne/cm^2$	lb_f/ft^2	$poundal/ft^2$
E אנרגיה	$kg_f \cdot m$	$J = N \cdot m$	$erg = dyne \cdot cm$	$lb_f \cdot ft = BTU$	$poundal \cdot ft$

$$slug = lb_f \cdot \frac{s^2}{m} \quad dyne = gr \cdot \frac{cm}{s^2} \quad poundal = lb_m \cdot \frac{ft}{s^2} \quad Pa = \frac{N}{m^2}$$

$$1[kg_f] = 9.81[N] \qquad kg_f \Leftrightarrow kg \qquad 1[bar] = 10^5[Pa]$$

$$1[lb_f] = 32.17[poundal] \qquad lb_f \Leftrightarrow lb_m$$

$$[psi] = \left[\frac{lb_f}{in^2}\right] = 144\left[\frac{lb_f}{ft^2}\right] \qquad 1[ft] = 12[in] \qquad 1[atm] = 101324.4[pa] = 14.7[psi]$$

$[psia] = [psi]$:אם לא נאמר אחרת , $P[psia] = p[psig] + 14.7[psi]$

$[W] = [J/s]$ $[hp] = 745.7[W]$:הספק , $BTU \to {}^\circ R$ $cal \to {}^\circ K$

$Na = 6.02 \cdot 10^{23}$ $M\left[\frac{gr}{mole} = \frac{kg}{kmole} = \frac{lbm}{lbmole}\right]$ $n = \frac{m}{M}[mole]$:mole - מול

משוואת המצב של גזים אידיאלים:

$$PV = nR_oT \quad PV = mRT \quad Pv = RT$$

$$\rho \triangleq \frac{m}{V} \triangleq \frac{1}{v} \quad v* \triangleq \frac{V}{n} \quad n \triangleq \frac{N}{Na} \quad K_B \triangleq \frac{R_o}{Na} \quad v** \triangleq \frac{V}{N}$$

$$P = \rho RT \quad Pv* = R_oT \quad PV = NK_BT \quad Pv** = K_BT$$

$$R_o = 8314.4\left[\frac{J}{kmole \cdot {}^\circ K}\right] \qquad R \triangleq \frac{R_o}{M}\left[\frac{J}{kg \cdot {}^\circ K}\right]$$

$$K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}\left[\frac{J}{{}^\circ k}\right] = 1.38 \cdot 10^{-16}\left[\frac{erg}{{}^\circ k}\right] = 8.6 \cdot 10^{-5}\left[\frac{eV}{{}^\circ k}\right]$$

$$E_k = \frac{3}{2}NK_BT = \frac{3}{2}RT$$

קבוע הגזים ביחידות שונות

$$8.314472\frac{J}{K\cdot mol}$$

$$8.20574587\cdot 10^{-5}\frac{m^3 atm}{K\cdot mol}$$

$$83.14472\frac{L\cdot mbar}{K\cdot mol}$$

$$1.987\frac{cal}{K\cdot mol}=\frac{BTU}{lbmole\cdot {}^\circ R}$$

$$62.3637\frac{L\cdot Torr}{K\cdot mol}$$

$$62.3637\frac{L\cdot mmHg}{K\cdot mol}$$

$$8.314472\frac{cm^3 MPa}{K\cdot mol}$$

$$8.314472\frac{m^3 Pa}{K\cdot mol}$$

$$8.314472\frac{L\cdot kPa}{K\cdot mol}$$

$$0.0820574587\frac{L\cdot atm}{K\cdot mol}$$

<u>החוק הראשון של התרמודינמיקה</u>: $Q=\Delta U+W$

$$q=\Delta u+w \Leftarrow q\triangleq\frac{Q}{m}\quad w\triangleq\frac{W}{m}\quad \Delta u\triangleq\frac{\Delta U}{m}$$

$$W_{1\to 2}=\int_1^2 PdV\qquad w_{1\to 2}=\int_1^2 Pdv\qquad \left(\Delta W=\underset{\Uparrow F}{\underline{PA}}\Delta x=P\Delta V\right)$$

בתהליך איזותרמי: $w_{1\to 2}=RT\cdot\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$.

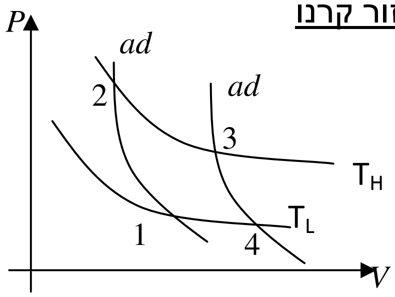
אנרגיה פנימית: $\Delta U=m\cdot C_V\cdot\left(T_2-T_1\right)$

$$\eta=\frac{W_{neto}}{Q_{in}}$$

$$C_P=C_V+R\qquad \gamma\triangleq\frac{C_P}{C_V}\qquad \gamma=1+\frac{R}{C_V}$$

$$C_P=\gamma C_V\qquad C_p=\frac{\gamma}{\gamma-1}R\qquad C_V=\frac{R}{\gamma-1}$$

<u>מחזור קרנו</u>

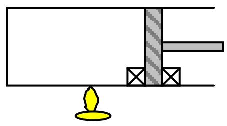
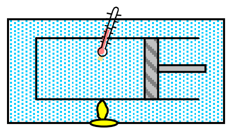
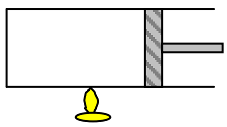
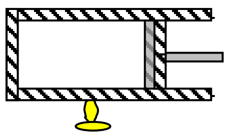


$$\frac{v_1}{v_4}=\frac{v_3}{v_2}=r$$

$$\eta_{ק}=\frac{\left|Q_H\right|-\left|Q_L\right|}{\left|Q_H\right|}=1-\frac{T_L}{T_H}$$

Q	ΔU	W	תהליך
0	$m\cdot C_V\cdot\left(T_H-T_L\right)$	$-\frac{m}{\gamma-1}\left(P_2v_2-P_1v_1\right)$	$1\to 2$
$\equiv W$	0	$mRT_H\ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)$	$2\to 3$
0	$m\cdot C_V\cdot\left(T_L-T_H\right)$	$-\Delta U$	$3\to 4$
$\equiv W$	0	$mRT_L\ln\left(\frac{v_1}{v_4}\right)$	$4\to 1$
$\Sigma Q\equiv\Sigma W$	0	$mR\ln r\cdot\left(T_H-T_L\right)$	$\sum$

תהליכים תרמודינמיים

סוג התהליך	W	Q	ΔU
איזוכורי 	0	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$
איזותרמי 	$mRT\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ $mRT\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ $nR_oT\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$	$\equiv W$	0
איזוברי 	$P(V_2-V_1)$ $mR(T_2-T_1)$	$m\cdot C_P\cdot(T_2-T_1)$	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$
אדיאבטי 	$-m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$ $\frac{P_1V_1-P_2V_2}{\gamma-1}$	0	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$
פוליטרופי	$\frac{P_1V_1-P_2V_2}{n-1}$	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)+$ $+\frac{P_1V_1-P_2V_2}{n-1}$	$m\cdot C_V\cdot(T_2-T_1)$

*חום שלילי = חום יצא, חיובי = נכנס ;

*עבודה שלילית = סביבה מבצעת עבודה, חיובית = מערכת מבצעת עבודה.

*סכום השינוי באנרגיה הפנימית (ΔU) במחזור סגור הוא 0.

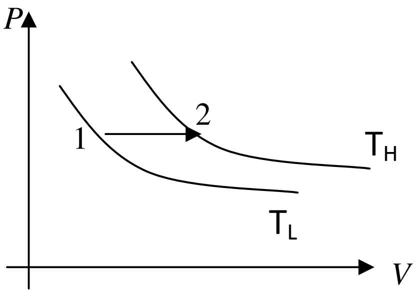
*מחזור קרנו = המחזור בעל הנצילות הגבוהה ביותר בין 2 טמפרטורות. וכמו כן: $\eta_{ק}=1-\frac{T_L}{T_H}$

בתהליך אדיאבטי: $\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ $\quad \frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$ $\quad \frac{P_1}{P_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma}$

$$COP=\frac{get}{invest}$$

<u>חום נכנס/יוצא?</u> $q=\Delta u+w$

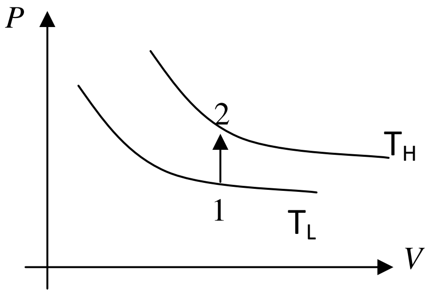
⊗ <u>תהליך איזוברי</u>



$$q=C_p\left(T_2-T_1\right)>0$$

$$\left.\begin{matrix} w>0 \\ \Delta u>0 \end{matrix}\right\}\Rightarrow q>0$$

⊗ <u>תהליך איזוכורי</u>



$$\left.\begin{matrix} w=0 \\ \Delta u>0 \end{matrix}\right\}\Rightarrow q>0$$

⊗ <u>איזותרמי</u>

$$\left.\begin{matrix} w>0 \\ \Delta u=0 \end{matrix}\right\}\Rightarrow q>0$$

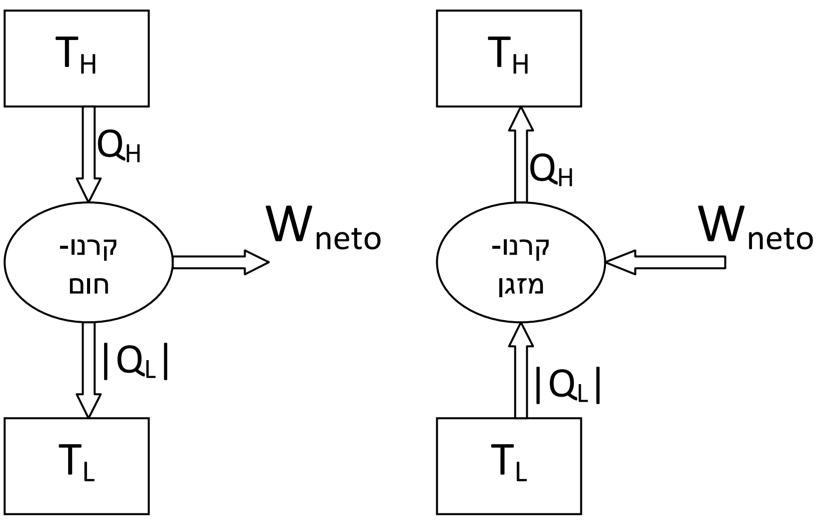
⊗ <u>לינארי</u>

$$\left.\begin{matrix} w>0 \\ \Delta u>0 \end{matrix}\right\}\Rightarrow q>0$$

או

$$\left.\begin{matrix} w>0 \\ \Delta u<0 \end{matrix}\right\}\Rightarrow q?$$

<u>מחזור קרנו בדיאגרמת בלוקים:</u>



<u>מש' מצב ואן-דר-ולס:</u>

$$\left(p+\frac{a'}{v^{*2}}\right)\left(v^{*}-b'\right)=R_oT$$

$$\left(p+\frac{a'}{v^{2}}\right)\left(v-b'\right)=RT$$

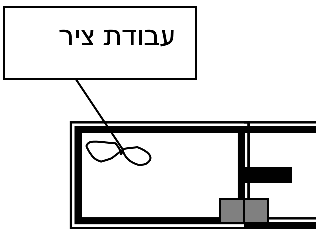
כאשר: a- נפח סגולי שתופסות המולקולות

b- השפעת כוחות בין מולקולריים

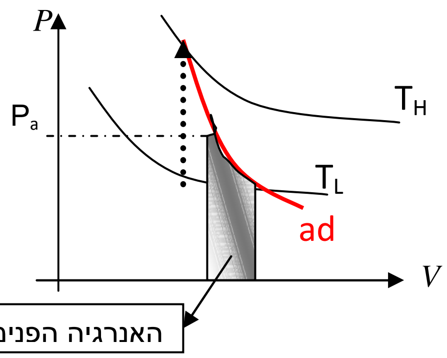
תהליכים לא הפיכים

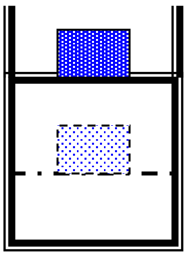
תהליך התפשטות/דחיסה קוואזיסטטית, עבודה קוואזיסטטית אדיאבטית ← הפיך

דוגמאות לתהליכים אדיאבטיים לא הפיכים:



$$W_{1\to2}=-mC_v(T_H-T_L)$$
עבודת ציר





$$\left.\begin{aligned}P_1&=P_a\\ P_2&=P_1+\frac{mg}{A}\end{aligned}\right\}W_{1\to2}=-\underbrace{P_2A}_{f}\cdot\underbrace{(l_2-l_1)}_{x}=-P_2\underbrace{(V_2-V_1)}_{V=A\cdot l}\qquad C_v\Delta T=P_2\Delta v$$

$$Pv=RT\qquad T_2=\frac{T_1\left(C_v+\frac{P_2}{P_1}R\right)}{C_v+R}$$

מערכת פתוחה – Open System

$$\dot m=\rho\underline{V}A=\frac{1}{v}\underline{V}A\Rightarrow\dot m v=\underline{V}A$$

במצב מתמיד / תמידי - $\dot m=\dot m_{out}=\dot m_{in}$.

$\underline{V}\to Velocity\qquad v\to specific\ volume$

$$\left[\frac{Energy\ in}{time}\right]+\dot Q=\dot W+\left[\frac{Energy\ out}{time}\right]$$

$\dot m_{in}u_{in}$	IE	$\dot m_{out}u_{out}(=\dot u)$
$\dot m_{in}\left(\frac{1}{2}V_{in}^2\right)$	KE	$\dot m_{out}\left(\frac{1}{2}V_{out}^2\right)$
$\dot m_{in}gz_{in}$	PE	$\dot m_{out}gz_{out}$

←

$$\dot m_{in}\left[0.5\underline{V}^2+u+Pv+gz\right]_{in}+\dot Q=$$
$$=\dot W+\dot m_{out}\left[0.5\underline{V}^2+u+Pv+gz\right]_{out}$$

אנטלפיה ואנטלפיה סגולית:

$$H\triangleq U+PV\qquad(V=volume)$$
$$h\triangleq u+Pv\triangleq\frac{H}{m}$$

$$dh=du+d(Pv)=$$
$$=C_vdT+RdT=C_pdT$$

$$\boxed{steady\ state\begin{cases}\dot Q=\dot W+\dot m\left[\Delta\left(0.5\underline{V}^2\right)+\Delta h+\Delta(gz)\right]\\ q=w+\Delta\left(0.5\underline{V}^2\right)+\Delta h+\Delta(gz)\end{cases}}$$

ברנולי מתקיים כאשר $\dot{Q}=\dot{m}\left(u_{out}-u_{in}\right)$, זרימה בלד"ח

$\rho=const, P=\text{var}\rightarrow T=\text{must be var}$

$P=\rho RT$

גם בתהליך אדיאבטי במערכת פתוחה: $q=Q=\dot{Q}=0$, $Pv^{\gamma}=const$. נכון לכל חלקיק זורם, לכן נכון לאוסף חלקיקים.

ניוטון

$a=\sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)}$, ניוטון הניח בטעות הנחה שמקבילה לתהליך איזותרמי: $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T=const}=RT\Rightarrow a\neq\sqrt{RT}$

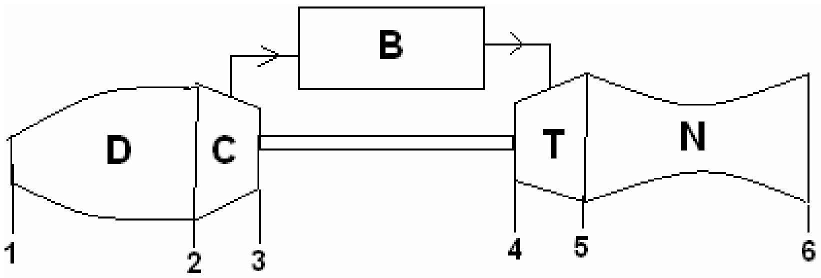
ההנחה הנכונה-תהליך אדיאבטי: $Pv^{\gamma}=\tilde{c}\Rightarrow P\left(\frac{1}{\rho}\right)^{\gamma}=\tilde{c}\Rightarrow P=\tilde{c}\cdot\rho^{\gamma}\Rightarrow\frac{\partial P}{\partial \rho}=\tilde{c}\cdot\gamma\cdot\rho^{\gamma-1}$

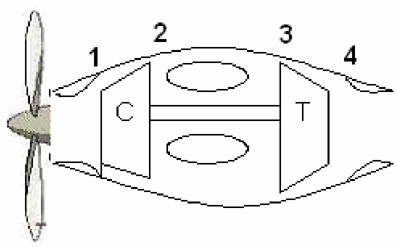
$$\boxed{a=\sqrt{\gamma RT}}$$

מולקולות

דרגות חופש: $f=DOF$ $\quad C_v=f\cdot\frac{1}{2}R$. $\gamma=\frac{f+2}{f}$

מולקולה חד אטומית	דו-אטומית	רב-אטומית
3- טרנסלטוריות	3- טרנסלטוריות 2- רוטציוניות + דרגה ויברציונית בחום גבוה	3- טרנסלטוריות 3- רוטציוניות (2 כאשר ליניארית) 1- ויברציונית
$C_V=3\cdot\frac{1}{2}R$ $C_P=C_V+R=\frac{5}{2}R$ $\gamma=\frac{C_P}{C_v}=\frac{5}{3}=1.666...$	$C_V=5\cdot\frac{1}{2}R$ $C_P=C_V+R=\frac{7}{2}R$ $\gamma=\frac{C_P}{C_v}=\frac{7}{5}=1.4$ בטמפ' גבוהות: $C_{V_{vib}}=\left(\frac{\theta_{vib}}{T}\right)^2\cdot\frac{e^{\theta_{vib}/T}\cdot R}{(e^{\theta_{vib}/T}-1)^2}$	$C_{V_{vib}}=\sum_{i=1}\left(\frac{\theta_i}{T}\right)^2\cdot\frac{e^{\theta_i/T}}{(e^{\theta_i/T}-1)^2}R$





מע' פתוחה, אבל נתייחס לכל שלב כסגורה.

דחף מנוע: $\boxed{F=\dot{m}_a\left(\underline{V}_{out}-\underline{V}_{in}\right)}$, $\dot{m}_a$ - ספיקת אוויר. $\dot{m}_f$ - ספיקת דלק.

יחס דלק-אוויר: $\boxed{f\triangleq\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}}$ לרוב נניח: $\dot{m}_a\gg\dot{m}_f$

<table>
<tr>
<td>D $(1\rightarrow2)$:
$\dot{Q}=\dot{W}=\underline{V}_2=0\qquad\dot{m}_1=\dot{m}_2$
$\frac{1}{2}\underline{V}_1^2=C_p\left(T_2-T_1\right)\qquad\frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma/\gamma-1}$</td>
<td>C $(2\rightarrow3)$:
$\dot{Q}=\underline{V}_2=\underline{V}_3=0\qquad\dot{m}_2=\dot{m}_3$
$0=h_2+h_3+w\qquad-w=C_p\left(T_3-T_2\right)$
במדחס הסביבה (טורבינה) מבצעת עבודה + אדיאבטי והפיך</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">B $(3\rightarrow4)$: $P=const$
$\dot{W}=\underline{V}_3=\underline{V}_4=0\qquad\dot{m}_a=\dot{m}_3\neq\dot{m}_4=\dot{m}_a+\dot{m}_f$
$\dot{Q}+\dot{m}_3\cdot h_3=\dot{m}_3\cdot h_4\qquad\dot{Q}=\dot{m}_f\cdot q_R$
$\dot{m}_f\cdot q_R=\left(\dot{m}_a+\dot{m}_f\right)C_pT_4-\dot{m}_aC_pT_3$
$f\cdot q_R=\left(1+\cancel{f}\right)C_pT_4-C_pT_3\qquad C_p\Delta T_{3\rightarrow4}=f\cdot q_R$</td>
</tr>
<tr>
<td>T $(4\rightarrow5)$:
$\dot{Q}=\underline{V}_4=\underline{V}_5=0\qquad\dot{m}_4=\dot{m}_5$
$-w_T=h_5-h_4=C_p\Delta T_{4\rightarrow5}\qquad\dot{W}_T=-\dot{W}_C$
$\left(\dot{m}_a+\dot{m}_f\right)w_T=-\dot{m}_aw_c\qquad-w_C\neq w_T>0$</td>
<td>N $(5\rightarrow6)$:
$\dot{Q}=\dot{W}=\underline{V}_5=0\qquad\dot{m}_5=\dot{m}_6$
$0<\frac{1}{2}\underline{V}_6^2=-C_p\left(T_6-T_5\right)\qquad\frac{p_5}{p_6}=\left(\frac{T_5}{T_6}\right)^{\gamma/\gamma-1}$</td>
</tr>
</table>

<u>תפקידים:</u>

<u>D כונס-</u> עוצר זרימה (אנרגיה←אנטלפיה) עליה באנטלפיה

<u>C מדחס-</u> עלייה בלחץ

<u>B תא שריפה-</u> עליה בטמפ' (בד"כ הנחה: לחץ קבוע)

<u>T טורבינה-</u> מניעה את המדחס (יוצרת עבודה)

<u>N נחיר-</u> מאיץ את הזורם (אנרגיה תרמית ← קינטית)

דף נוסחאות – תרמודינמיקה - 084213

$$F = ma = m\frac{d\underline{V}}{dt} = m\frac{d\underline{V}}{ds}\cdot\underbrace{\frac{ds}{dt}}_{\underline{V}}$$

$$\underbrace{\int_1^2 Fds}_{W} = \int_1^2 m\underline{V}d\underline{V} = \underbrace{\frac{1}{2}m\left(\underline{V}_2^2 - \underline{V}_1^2\right)}_{\Delta E_k} \qquad \int_1^2 Fdt = \int_1^2 md\underline{V} = \underbrace{m\left(\underline{V}_2 - \underline{V}_1\right)}_{\Delta P}$$

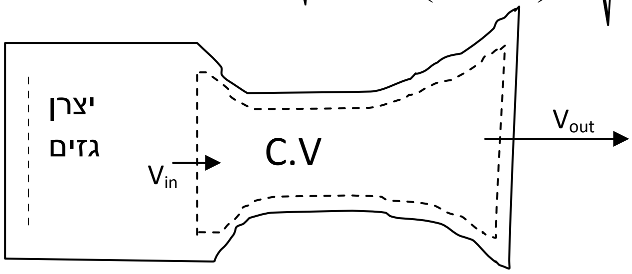
החוק הראשון של התרמודינמיקה – משוואת שימור אנרגיה.

<u>חישוב הנחיר (מנוע רקטי)</u>

$$\Delta\left(gz\right) \ll \Delta h \qquad V_{out} \gg V_{in} \qquad \dot{W} \equiv 0\left(v = const\right) \qquad \dot{Q} = 0\left(adiabate\right)$$

$$\dot{m}\left[\left(\frac{1}{2}V^2 + h + \cancel{gz}\right)_{out} - \left(\cancel{\frac{1}{2}V^2} + h + \cancel{gz}\right)_{in}\right] = \cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}}$$

$$\dot{m}\left[\frac{1}{2}V_{out}^2 + \Delta h\right] = 0 \qquad V_{out} = \sqrt{2C_pT_{in}\left(1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}\right)} = \sqrt{2C_pT_{in}\left(1 - \left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right)}$$



<u>זרימה בצנרת</u>

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[\Delta\left(\frac{1}{2}\underline{V}^2\right) + \Delta h + \Delta(gz)\right]$$

הנחות: (א) $\dot{Q} \equiv 0$. (ב) אופקי: $\Delta\left(gz\right) \equiv 0$. (ג) תמידי ו- $V_{out} = V_{in}$. (ד) נוזל כמו מים, לא גז אידיאלי. $Pv \neq RT$ ובכל זאת נניח $\Delta u = 0$. (ה) בנוזל $\rho = 1/v = const$ (← גם הנפח הסגולי)

$$-\dot{W} = \dot{m}\left[\left(Pv\right)_{out} - \left(Pv\right)_{in}\right] = \dot{m}\frac{1}{\rho}\left[P_{out} - P_{in}\right]$$

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} \triangleq w \qquad -w = \frac{1}{\rho}\left[P_{out} - P_{in}\right]$$

כאשר $P_{out}>P_{in}$ אז $\dot{W} < 0$, משקיעים עבודה, כלומר מספקים <u>הספק</u> למשאבה

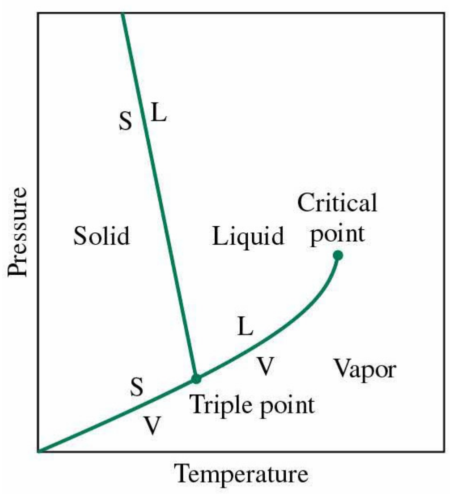
<u>רישום דיפרנציאלי לחוק הראשון – מערכת פתוחה</u>

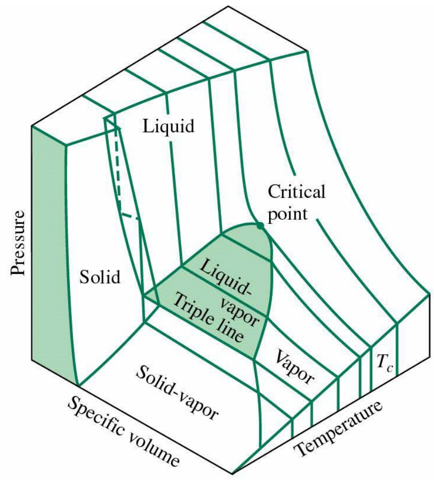
מחולק ב- $\dot{m}$: $dq - dw = d\left(\frac{1}{2}\underline{V}^2\right) + du + d(pv) + d(gz)$

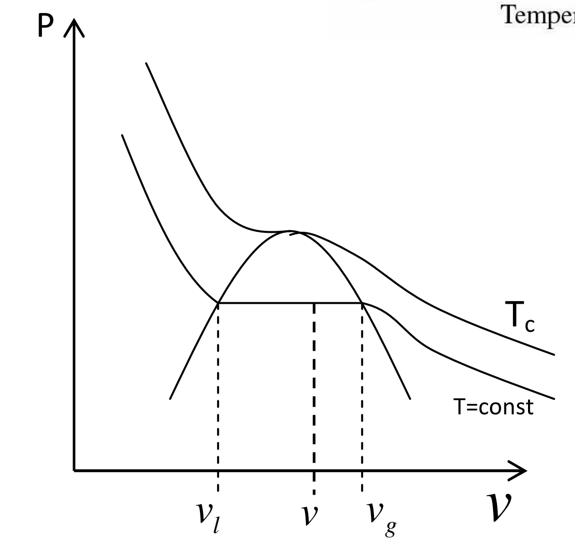
בבעיות צנרת: $-dw = d\left(Pv\right) = P\cancel{dv} + vdP$

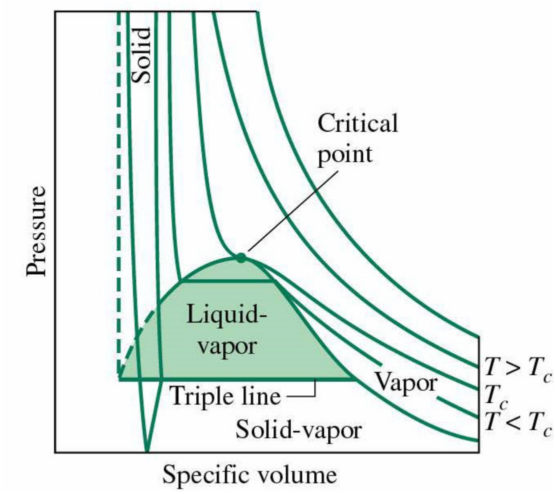
הזרמה לגובה: $-\dot{W} = \dot{m}\left[\left(gz_{out} - gz_{in}\right) + \frac{1}{\rho}\left(P_{out} - P_{in}\right)\right]$

בנוזלים אסור להשתמש במש' שפותחו עבור גז אידיאלי כמו: $PV = nR_oT \;,\; Pv^{\gamma} = \tilde{c}$









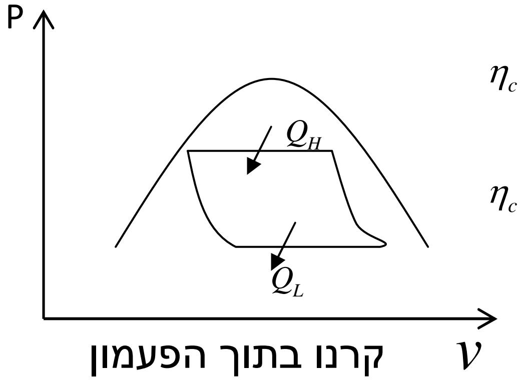
$$q_{1\to 2} = w_{1\to 2} + \Delta u_{1\to 2} = p\left(v_2 - v_1\right) + u_2 - u_1 \qquad m_{Tot} = m_l + m_g$$

$$q_{l\to g} = \left(u_g + pv_g\right) - \left(u_l + pv_l\right) = h_g - h_l = h_{g,l} \qquad \chi \triangleq \frac{m_g}{m} \qquad \frac{m_l}{m} = 1 - \chi$$

$$u = \chi u_g + \left(1-\chi\right)u_l \qquad v = \chi v_g + \left(1-\chi\right)v_l$$

$$h = \chi h_g + \left(1-\chi\right)h_l \qquad v = \chi h_g + \left(1-\chi\right)h_l \qquad \left(\chi = \frac{v - v_g}{v_g - v_l}\right)$$

לעתים במקום g מסומן v (vapor) ובמקום l מסומן f (fluid).



קרנו בתוך הפעמון

$$\eta_c = \frac{W_{neto}}{Q_H} = \frac{w_{neto}}{q_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H} \xrightarrow[T_H \to T_L]{} \frac{dT}{T}$$

$$\eta_c = \frac{dp\left(v_g - v_l\right)}{\hat{l}_{l\to g}} \qquad \hat{l}_{l\to g} = \text{Latent Heat for Vaporization}$$

($\hat{l}_{l\to g}$ - החום כמוס לאידוי.) נניח $v_g \gg v_l \Rightarrow v_g - v_l \approx v_g$

$\frac{dT}{T} \approx \frac{dp \cdot v_g}{\hat{l}_{l,g}}$. נניח כי האדים הם גז אידיאלי: $\frac{dp}{p} = \frac{\hat{l}_{l,v}}{R}\frac{dT}{T^2}$

$\ln p = -\frac{l_{l,v}}{R}\frac{1}{T} + \ln C \Rightarrow p = C\exp\left(-\frac{l_{l,v}}{RT}\right)$ בתוך או על הפעמון.

אנטרופיה

$$dS \triangleq \frac{dQ}{T} \quad ds \triangleq \frac{dq}{T} \quad dq = du + dw = C_V dT + Pdv$$

$$\Rightarrow ds = C_V \frac{dT}{T} + \frac{P}{T}dv = C_V \frac{dT}{T} + \frac{R}{v}dv$$

$$m\Delta s = \Delta S$$

$$\boxed{\Delta s_{1\to 2} = C_V \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1} = C_P \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{P_2}{P_1}}$$

בקרנו: $S = \frac{Q}{T}$ $\quad Q_L = -AT_L \quad Q_H = T_H \overbrace{mR\ln\frac{v_3}{v_2}}^{A} = AT_H$

כאשר $dq \equiv 0$ בתהליך הפיך בגז אידיאלי, גם $ds \equiv 0$.

בתהליך אדיאבטי: $\Delta s_{surround} \equiv 0$. בכל תהליך קיים: $\Delta s_{universe} \geq 0 (= 0 \text{ for reversible})$

בתהליך איזותרמי $T = const$: $S_2 - S_1 = mR\ln\frac{v_2}{v_1}$

$$\Delta s_{universe} \triangleq \Delta s_{surround} + \Delta s_{sys}$$

האנטרופיה ביקום יכולה רק לעלות!

תהליכים אדיאבטיים לא הפיכים

$$\Delta s_{system} > 0 \qquad \Delta s_{universe} > 0 \qquad \Delta s_{surround} \equiv 0$$

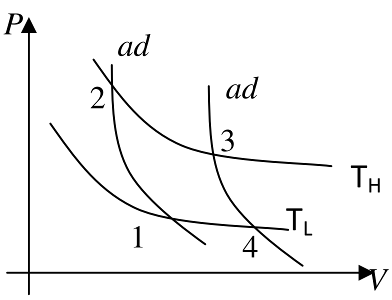
אי אפשר להפריד חזרה גזים שהתערבבו.

ניסוחים של החוק השני $\Delta s_{universe} \geq 0$

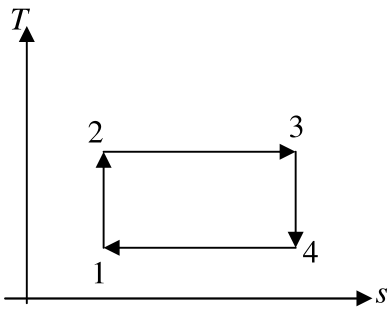
א. **קלזיוס** – מכונה לא יכולה לעבוד במחזורים ולהעביר חום רק ממאגר A למאגר B בלי השקעה מהסביבה

ב. **קלווין-פלאנק** – מכונה לא יכולה לעבוד במחזורים ולהוציא חום ממאגר אחד בלבד ולהוציא אותו לעבודה

חום לא יכול לזרום מטמפרטורה נמוכה לגבוהה.



$\Leftarrow$



$$ds \triangleq \frac{dq}{T}$$

$$q = T\int ds = T\Delta s$$

$$\Delta s_H = -\Delta s_L = \frac{Q_H}{T_H} = A$$

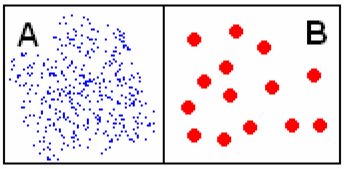
- <u>תהליך קוואזיסטטי</u>: תהליך הדרגתי, שבו בכל רגע המערכת בשווי משקל
- <u>תהליך הפיך</u>: (בהכרח קוואזיסטטי, **<u>ולא</u>** <u>הפוך</u>) תהליך שניתן לחזור עליו בכיוון הפוך ולהגיע למצב ההתחלתי (ע"י אותה כמות אנרגיה בסימן הפוך).

מכונה שפולטת פחות חום מאשר מכונת קרנו סותרת את החוק השני!

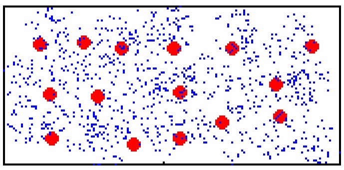
מכונה שמושכת יותר חום ממאגר עליון מאשר קרנו, סותרת את החוק השני!

השד של מקסוול

מקסוול טען שניתן בלי להשקיע אנרגיה להוריד את האנטרופיה של היקום (כלומר שהחוק ה-II לא נכון). הגדלת אי הסדר אקוויוולנטית לגודל האנטרופיה. (הוצע במשך השנים שלאחר מכן – האנרגיה שדרושה לשד כדי להפריד בין מולקולות גדולה יותר מהאנרגיה שאפשר להפיק מההפרדה ולפיכך אין כל סתירה לחוק השני).



$$pV = nR_oT \rightarrow \boxed{\frac{V_A}{V_B} = \frac{n_A}{n_B}}, \qquad \boxed{\frac{p_o}{p_x} = \frac{n_o}{n_x}}$$



$$V_o = V_x = \tilde{V}, \quad T_o = T_x = \tilde{T}, \quad p_o \neq p_x$$

$$p_o + p_x = \bar{p}, \quad n_o + n_x = n, \quad \frac{V_A}{V} = \frac{n_A}{n}$$

שבר מולי של גז i: $\sum x_i = 1$, $\boxed{x_i \triangleq \frac{n_i}{n}}$, שבר מסי: $\sum y_i = 1$, $\boxed{y_i \triangleq \frac{m_i}{m}}$.

$$\boxed{x_i = \frac{p_i}{\bar{p}} = \frac{V_i}{\tilde{V}}} \quad \boxed{M_{eq} = \sum x_i M_i = \frac{1}{\sum \frac{y_i}{M_i}}} \quad \boxed{R_{eq} = \frac{R_o}{M_{eq}}} \quad M_{eq} \cdot y_i = M_i \cdot x_i$$

$$C_p = \sum C_{p,i} \cdot y_i \qquad (per-mole)\bar{C}_p = \sum C_{p,i} \cdot x_i$$

$$C_v = \sum C_{v,i} \cdot y_i \qquad (per-mole)\bar{C}_v = \sum C_{v,i} \cdot x_i$$

גדלים סגוליים: $u = \sum y_i \cdot u_i$ וכולי.

<u>שים לב</u>: בתערובות גזים מומלץ לא להשתמש בערכים סגוליים.

יחסי מקסוול למע' סגורה

החוק ה-I: $\underbrace{Tds}_{dq} = \underbrace{C_v dT}_{du} + \underbrace{pdv}_{dw}$. פונקציות הלמהולץ וג'בס הן דיפרנציאל שלם ופונק מצב.

פונק' הלמהולץ: $da = -pdv - sdT \qquad a = u - T \cdot s \qquad \boxed{A \triangleq U - T \cdot S}$

לא חייב להיות גז אידיאלי, אבל חייבת להיות עבודה קוואזיסטטית. באיזותרמי: $da = -dw$

$$\boxed{-\left.\frac{\partial p}{\partial T}\right|_{v=const} = -\left.\frac{\partial s}{\partial v}\right|_{T=const}}$$ אגף ימין לא מדיד, לעומת השמאלי שכן.

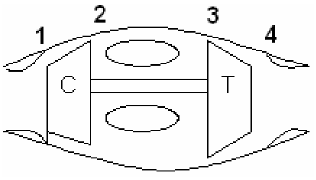
פונקצית ג'בס: $dg = vdp - sdT \qquad g = h - T \cdot s \qquad \boxed{G \triangleq H - T \cdot S}$

$$\boxed{\left.\frac{\partial v}{\partial T}\right|_{p=const} = -\left.\frac{\partial s}{\partial p}\right|_{T=const}}$$ אגף ימין לא מדיד, לעומת השמאלי שכן.

מתחת לפעמון (דיאגראמת $p-v$) פונקצית גיבס קבועה.

$$dq \equiv 0, dp \equiv 0 \Rightarrow dg = 0 \Rightarrow g_{1\rightarrow 2} = const$$

מחזור ברייטון



מחזור ברייטון – מחזור אידיאלי ← תהליכים אידיאלים

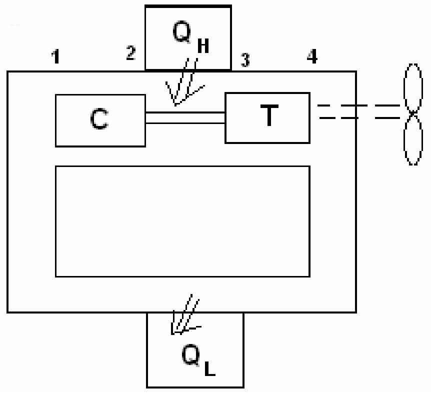
א) זרימה במדחס איזוטרופית = אין איבוד חום, תהליך הפיך.

ב) זרימה בטורבינה איזנטרופית – תהליך הפיך

ג) שריפה בתאי שריפה בלחץ קבוע. כל חלק במע' מבודד.

המטרה: לחשב נצילות אווירודינמית

מע' פתוחה – במחזור סגור



הנחות: מ-(ג) נובע $p_2 = p_3$. ד) $\dot{m}_4\left(\frac{1}{2}V^2\right)_4 = \dot{m}_1\left(\frac{1}{2}V^2\right)_1$

ה) מצב תמידי: $\dot{m}_1 = \dot{m}_4$ ו) $p_1 = p_4$

$$\dot{Q}_{H,2\to3} = \dot{m}C_p\left(T_3 - T_2\right) \qquad \left|\dot{Q}_L\right|_{4\to1} = \dot{m}C_p\left(T_4 - T_1\right)$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \qquad \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1/\gamma}}$$

T_2 איננה הטמפ' המקסימאלית. לכן ניתן לשנות את הטמפ' המקסימאלית מבלי לשנות את הנצילות.