

Ексергија

Укупну енергију (E) садржану термодинамичком у систему можемо изразити као збир ексергије (Ex) и анергије (An):

$$E = Ex + An$$

- Ексергија (Ex) (*Availability*) или радна способност представља онај део укупне енергије радне супстанце, тоplotног извора или тоplotног понора који се може претворити у користан механички рад.
- Анергија (An) – представља онај део укупне енергије поседује радне супстанце, тоplotног извора или тоplotног понора, а која се може претворити у користан механички рад.

Да би радна супстанца имала ексергију она **мора да буде у термичкој, механичкој или хемијској неравнотежи са околином** или да буде у стању **неравнотеже кинетичке, потенцијалне енергију**. Будући да у том случају постоји разлика енергетских потенцијала за сваки од ових случаја неравнотеже, постоји могућност да се та разлика енергија потенцијала искористи за добијање механичког рада.

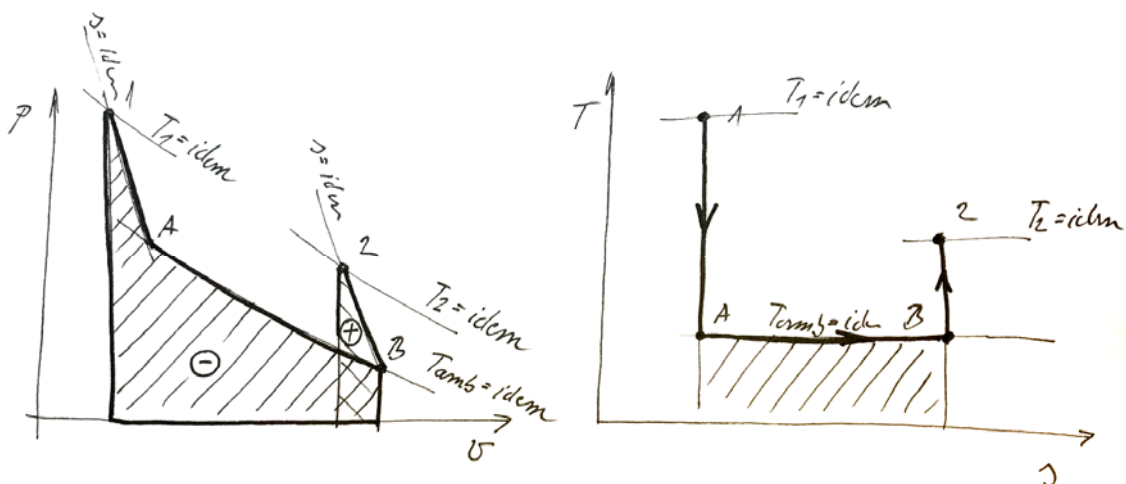
„Врсте“ ексергија

- Ексергија радне супстанце у затвореном термодинамичком систему
- Ексергија тока радне супстанце (радне супстанце у отвореном (проточном) термодинамичком систему)
- Ексергија тоplotног извора или тоplotног понора – ексергија „топлоте“
- Ексергија запремиског и ексергија техничког рада

Ексергија радне супстанце у затвореном термодинамичком систему

Максималан запремински рад

- Запремински рад који радна супстанца обави при преласку из стања 1 у стање 2 на повратан начин (повратним променама стања) назива се максималан запремински рад.



Повратне промене стања (1-A равнотежна и адијабатска експанзија, А-Б изотермска повратна промена стања, Б-2 равнотежна и адијабатска компресија)

Промена ентропије топлотно изолованог система при преласку радне супстанца из стања 1 у стање 2 повратним променама стања:

$$\Delta S_{tis} = \Delta S_{rm} + \Delta S_{ti} = \Delta S_{rm} + \Delta S_{amb}$$

$$\Delta S_{rm} = -\Delta S_{ti}$$

Максимални запремински рад при преласку радне материје из стања 1 у стање 2,

Промена 1-A (равнотежна и адијабатска експанзија)

$$Q_{1-A} + W_{V,1-A} = U_A - U_1, \quad Q_{1-A} = 0 \quad (1)$$

Промена А-Б (повратна изотермска предаја топлоте)

$$Q_{A-B} + W_{V,A-B} = U_B - U_A \quad T(S_B - S_A) + W_{V,A-B} = U_B - U_A \quad (2)$$

Промена 1-A (равнотежна и адијабатска компресија)

$$Q_{B-2} + W_{V,B-2} = U_2 - U_B, \quad Q_{B-2} = 0 \quad (3)$$

Сабирањем једначина (1), (2) и (3) добија се:

$$T_{\text{amb}} (S_B - S_A) + W_{V,1-A} + W_{V,A-B} + W_{V,2-B} = U_2 - U_1,$$

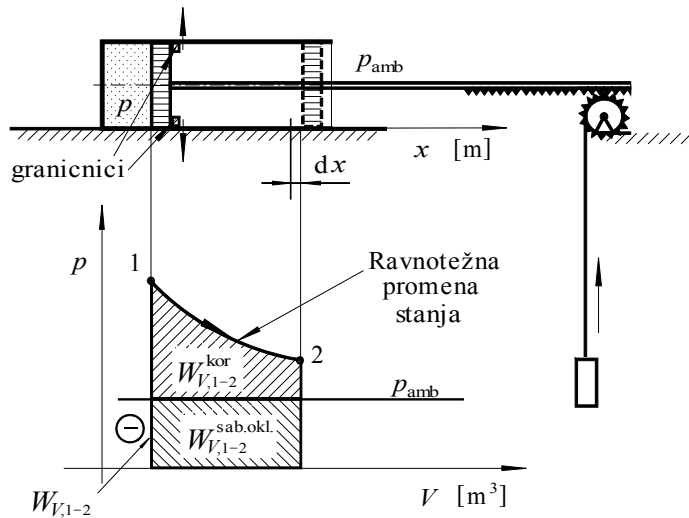
одакле може да се изрази максималан запремински рад:

$$W_{V,\text{max}} = U_2 - U_1 - T_{\text{amb}} (S_2 - S_1), \quad W_{V,\text{max}} = W_{V,1-A} + W_{V,A-B} + W_{V,B-2}.$$

Користан запремински рад

При сабијању гаса који се налази у цилиндру, поред дејства механичке силе и околини ваздух, притиском p_{amb} доприноси сабијању гас, те на тај начин и он делом обавља рад над системом ($dV < 0$, сабијање). При супротном процесу, ширењу гаса у цилиндру ($dV > 0$), део рада се користи (“троши”) за сабијање околине. Другим речима извршени запремински рад $W_{V,1-2}$ се састоји од корисног запреминског рада $W_{V,1-2}^{\text{kor}}$ и запреминског рада сабијања околине $W_{V,1-2}^{\text{sab.okol.}}$

$$W_{V,1-2} = W_{V,1-2}^{\text{kor}} + W_{V,1-2}^{\text{sab.okol.}}$$



$$W_{V,1-2} = -\int_1^2 p dV = -\int_1^2 \left(p_{\text{amb}} + \frac{F}{A} \right) dV$$

$$W_{V,1-2} = -\int_1^2 p_{\text{amb}} dV + W_{V,1-2}^{\text{kor}}$$

$$W_{V,1-2}^{\text{sab.ok}} = -\int_1^2 p_{\text{amb}} dV = -p_{\text{amb}} (V_2 - V_1)$$

- ширење $dV > 0$ $W_{V,1-2}^{\text{sab.ok}}$ $(-)$
- сабијање $dV < 0$ $W_{V,1-2}^{\text{sab.ok}}$ $(+)$

Максималан користан запремински рад

Максималан користан запремински рад ($W_{V,1-2}^{\text{max.kor.}}$), као што му и име каже, представља користан део максималног рада (повратне промене), односно део максималног запреминског рада ($W_{V,1-2}^{\text{max}}$) умањеног за рад сабијања околине ($W_{V,1-2}^{\text{sab.okol.}}$).

$$W_{V,1-2}^{\text{max}} = W_{V,1-2}^{\text{max.kor.}} + W_{V,1-2}^{\text{sab.okol.}} \Rightarrow W_{V,1-2}^{\text{max.kor.}} = W_{V,1-2}^{\text{max}} - W_{V,1-2}^{\text{sab.okol.}}$$

Рад потребан за сабијање околине:

$$W_{V,1-2}^{\text{sab.ok}} = -\int_1^2 p_{\text{amb}} dV = -p_{\text{amb}} (V_2 - V_1)$$

Максималан користан рад при преласку радне супстанце на стање околине

Ексергија радне супстанце у затвореном термодинамичком систему (Ex_V) представља максималан користан запремински рад који она може да оствари преласком на стање околине. Према томе, вредност ексергије радне супстанце стања 1 ($Ex_{V,1}$) у затвореном термодинамичком систему једнака је негативној вредности максималног корисног запреминског рада ($W_{V,1-2}^{\text{max.kor.}}$)

$$Ex_{V,1} = -W_{V,1-\text{amb}}^{\text{max.kor.}} = U_1 - U_{\text{amb}} - T_{\text{amb}}(S_1 - S_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}}(V_1 - V_{\text{amb}})$$

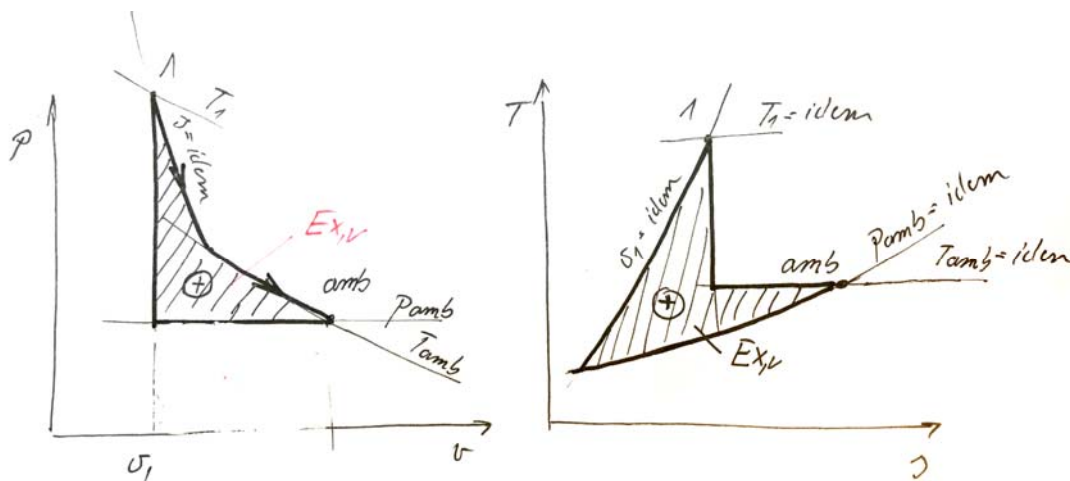
или

$$Ex_{V,1} = m[u_1 - u_{\text{amb}} - T_{\text{amb}}(s_1 - s_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}}(v_1 - v_{\text{amb}})]$$

Ексергију радне супстанце у затвореном термодинамичком систему је могуће изразити и преко специфичне ексергије радне супстанце (ex).

$$Ex_V = m \cdot ex_V, \quad ex_V = u - u_{\text{amb}} - T_{\text{amb}}(s - s_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}}(v - v_{\text{amb}})$$

Ексергија није величина стања, јер зависи од стања околине.



Ексергија флуидног тока - радне супстанце у проточном термодинамичком систему

Ексергија флуидног тока радне супстанце представља максималан технички рад који радна супстанца може да обави преласком на стање околине.

Ексергија флуидног тока радне супстанце (\dot{Ex}_f) састоји се од ексергије услед поседовања макроскопске кинетичке енергије ($\dot{Ex}_{f,kin}$), затим макроскопске потенцијалне енергије ($\dot{Ex}_{f,pot}$), термодинамичке неравнотеже (неравнотеже притиска, температуре, концентрације) у односу на околину ($\dot{Ex}_{f,td}$), евентуално нуклеарне енергије ($\dot{Ex}_{f,nuk}$) и других видова енергија ($\dot{Ex}_{f,i}$)

$$\dot{Ex}_f = \dot{Ex}_{f,kin} + \dot{Ex}_{f,pot} + \dot{Ex}_{f,td} + \dots + \dot{Ex}_{f,nuk} + \sum \dot{Ex}_{f,i}$$

Део ексергије флуидног тока који потиче од кинетичке енергије јесте максимални технички рад који радна супстанца може да изврши преласком на стање околине – стање мировања:

$$\dot{Ex}_{f,kin} = q_m \frac{w_f^2}{2};$$

Део ексергије флуидног тока који потиче од потенцијалне енергије јесте максимални технички рад који радна супстанца може да изврши преласком на најнижи ниво макроскопске потенцијалне енергије:

$$\dot{E}x_{f,pot} = q_m \cdot g \cdot z ;$$

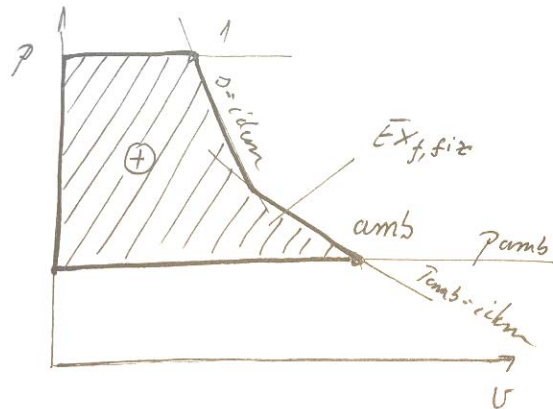
Део ексергије који потиче од термодинамичке неравнотеже флуидног тока у односу на околинау састоји се од физичког и хемијског дела:

$$\dot{E}x_{f,td} = \dot{E}x_{f,fiz} + \dot{E}x_{f,hem}$$

Физички део термодинамичке ексергије представља максималан технички рад (повратним променама стања – изентопском и изотермском равнотежном променом стања), који радна супстанца може да обави преласком на стање околине :

$$\dot{E}x_{f,fiz} = q_m \left[(h - h_{amb}) - T_{amb} (s - s_{amb}) \right] \text{ или}$$

$$\dot{E}x_{f,fiz,l} = \left[(h_1 - h_{amb}) - T_{amb} (s_1 - s_{amb}) \right] .$$



За идеалан гас, физички део термодинамичке ексергије радне супстанције се може изразити као:

$$\dot{E}x_{f,fiz,l} = q_m \left[c_p (T_1 - T_{amb}) - T_{amb} \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_{amb}} - R \ln \frac{p_1}{p_{amb}} \right) \right]$$

Хемијски део термодинамичке ексергије радне супстанције, јесте технички рад који се може остварити на основу разлике у концентрацијама појединих компоненти (парцијалних притиска p^*) у радној супстанцији и њиховим концентрацијама у околном ваздуху.

За једнокомпонентан идеалан гас он се може изразити као:

$$\dot{E}x_{f, \text{hem}} = q_m \cdot R \cdot T_{\text{amb}} \cdot \ln \frac{p_{\text{amb}}}{(p^*)_{T_{\text{amb}}}} = q_m \cdot R \cdot T_{\text{amb}} \cdot \ln \frac{1}{(x_1)_{T_{\text{amb}}}}$$

За вишекомпонентан идеалан гас он се може изразити као:

$$\dot{E}x_{f, \text{hem}} = q_m \cdot T_{\text{amb}} \cdot \sum_{i=1}^n w_i \cdot R_i \cdot \ln \frac{(x_i)_{\text{sm}}}{(x_i)_{\text{amb}}}$$

Ексергија топлотног извора или топлотног понора – ексергија „топлоте“

Ексергија топлоте јесте максималан рад који би могао да добије у процесу предаје топлоте околини.

Да би се добио максималан рад неопходно је да процес предаје топлоте буде повратан. То је могуће једино у случају да се процес обави помоћу допунске радне материје, која ће обављати неки повратни кружни процес. У случају процеса предаје топлоте из изотермног топлотног извора овај циклус јесте Карноов (Carnot) кружни процес, који би допунска радна супстанца обавила између температуре топлотног извора и температуре околине. Отуда се ексергија топлоте у овом случају одређује као производ термодинамичког степена корисности и количине топлоте коју преда топлотни извор - прими допунска радна супстанца (Q_{prim}):

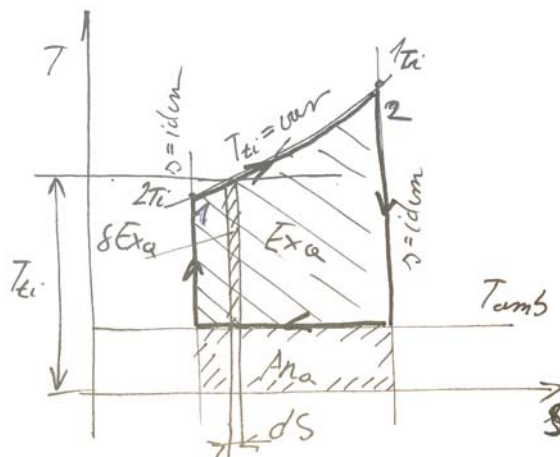
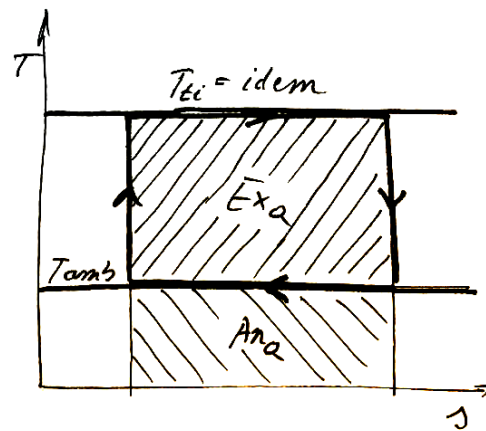
$$Ex_Q = \eta_C \cdot Q_{\text{prim}} = \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{ti}}}\right) \cdot Q_{\text{prim}} = Q_{\text{prim}} - Q_{\text{prim}} \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{ti}}}$$

У случају да температура топлотног извора није сталан ($T_{\text{ti}} = \text{var}$), за остваривање повратног процеса предаје топлоте околини, неопходно је да допунска радна супстанца, мењајући температуру, на повратан начин прими топлоту, или да се са неопходна повратност оствари са бесконачно много сукцесивних Карноових процеса (као на слици). У том случају, укупна ексергија топлоте добила би се интеграцијом диференцијално малих ексергија топлоте остварених у тим карноовим циклусима:

$$\delta Ex_Q = \eta_C \cdot \delta Q_{\text{prim}} = \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{ti}}}\right) \cdot \delta Q_{\text{prim}}$$

$$Ex_Q = Q_{1-2} - T_{\text{amb}} \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_{\text{ti}}} = Q_{1-2} - T_{\text{amb}} \int_1^2 dS$$

$$Ex_Q = Q_{1-2} - T_{\text{amb}} (S_2 - S_1)$$



Формални биланс ексергије за затворени термодинамички систем

$$\underbrace{Ex_{Q,1-2} + [W_{V,1-2} + p_{\text{amb}}(V_1 - V_2)]}_{\text{Primljene ili predate eksergije toplotom ili radom}} = \underbrace{\sum (Ex_{i,2} - Ex_{i,1})}_{\text{Promena eksergije radne(ih) materije(a) koje se nalaze u zatvorenom sistemu}} + \underbrace{Ex_{\text{gub}}}_{\text{Deo eksergije koji nestane usled nepovratnih procesa}}$$

или

$$Ex_{Q,1-2} + [W_{V,1-2} + p_{\text{amb}}(V_1 - V_2)] = \sum \Delta Ex_{i,1-2} + Ir$$

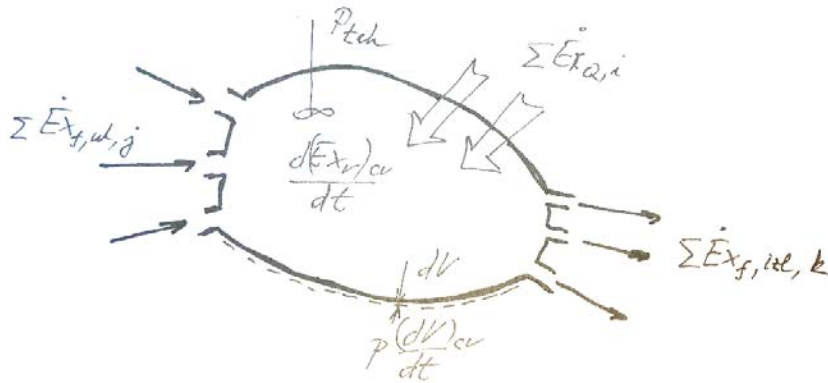
При чему се изгубљена ексергија или иреверзибилност процеса може одредити помоћу Gouy-Stodolinog израза:

$$Ex_{\text{gub}} = Ir = T_{\text{amb}} \cdot \Delta S_{\text{tis}},$$

У случају да постоји се у затвореном систему налази само једна радна супстанца, Формални биланс ексергије се своди на следећи облик:

$$Ex_{Q,1-2} + [W_{V,1-2} + p_{\text{amb}}(V_1 - V_2)] = Ex_2 - Ex_1 + Ex_{\text{gub}}.$$

Формални биланс ексергије за проточни термодинамички систем



За проточни темодинамички систем при неустаљеним условима:

$$\sum (Ex_Q)_i + P_{\text{teh}} + \sum (\dot{Ex}_{f,ul})_j = \frac{d(Ex_V)_{cv}}{dt} + \sum (\dot{Ex}_{f,izl})_k + \dot{Ex}_{\text{gub}},$$

или

$$\sum (\dot{Ex}_Q)_i + P_{\text{teh}} + \sum (q_{m,ul} \cdot ex_{f,ul})_j = \frac{d(Ex_V)_{cv}}{dt} + \sum (q_{m,izl} \cdot ex_{f,izl})_k + \dot{Ex}_{\text{gub}}$$

У случају да систем ради у устаљеном режиму, формални биланс ексергије се своди на:

$$\sum (\dot{Ex}_Q)_i + P_{\text{teh}} + \sum (\dot{Ex}_{f,ul})_j = \sum (\dot{Ex}_{f,izl})_k + \dot{Ex}_{\text{gub}}$$

Када је топлотни проток променљив по контури проточног система, тј. зависан од места на коме се предаје, тада се ексергија топлотног протока одређује као:

$$\dot{E}x_Q = \int_{cs} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cs}} \right) \cdot \dot{\varphi} \cdot dA,$$

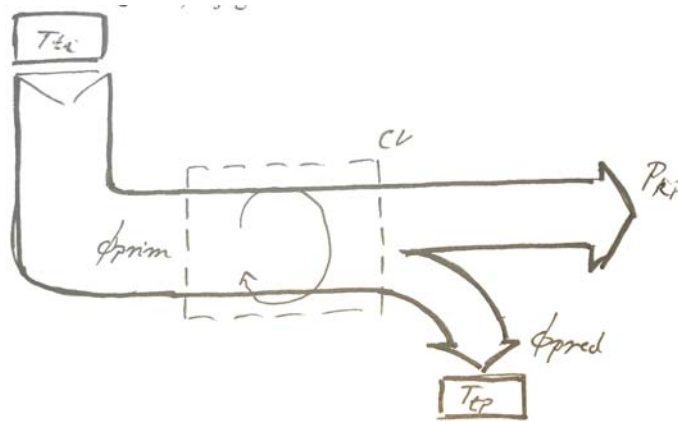
Sankey-ев (енергетски) и Grassmann-ов (ексергетски) дијаграм

Sankey-евим дијаграмом, токови енергије у процесима њене трансформација представљају у виду трака одговарајуће дебљине

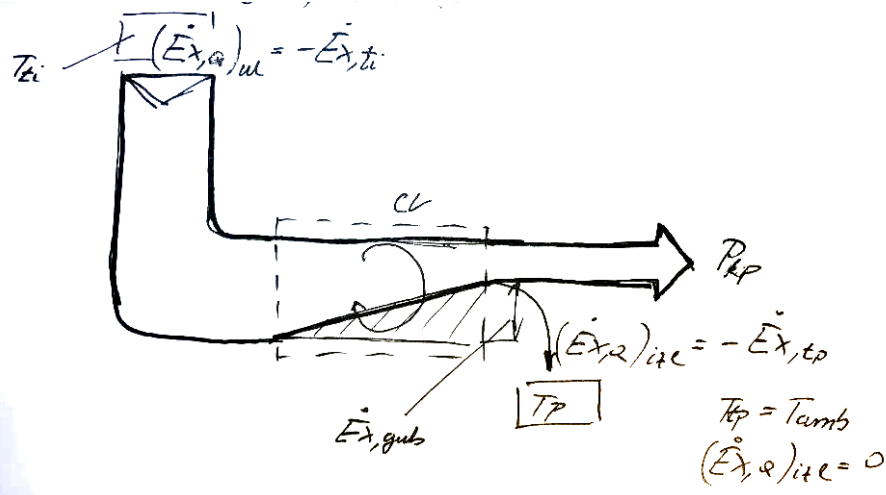
Grassmann-овим дијаграмом токови ексергија у процесима трансформација енергије, представљају се у виду трака одговарајуће дебљине

Деснокретни кружни процес

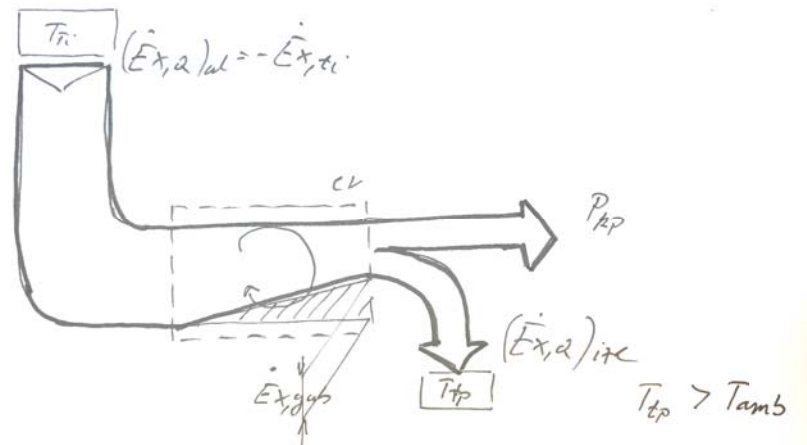
Sankey-ев (енергетски) дијаграм



Grassmann -ов (ексергетски) – без когенерације



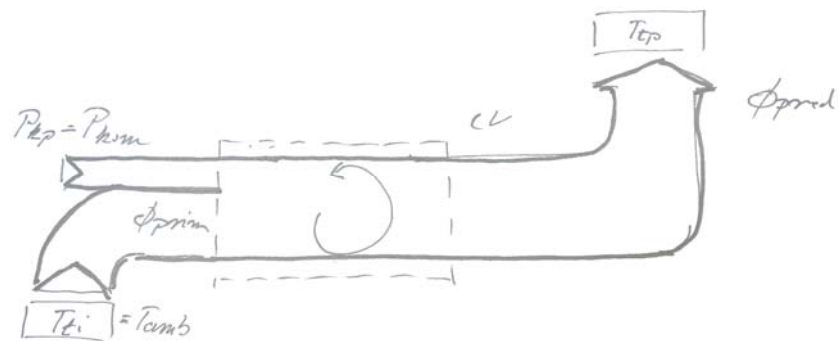
Grassmann -ов (ексергетски) – са когенерацијом



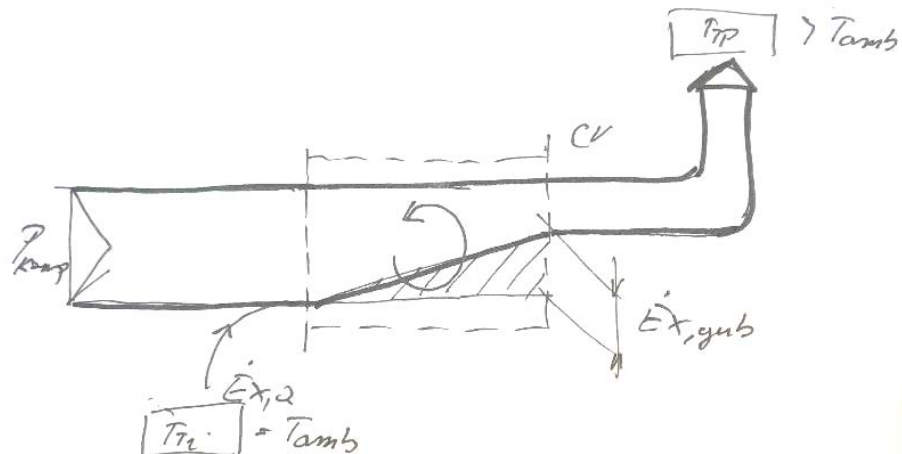
Левокретни кружни процес

Топлотна пумпа

Sankey-ев (енергетски) дијаграм

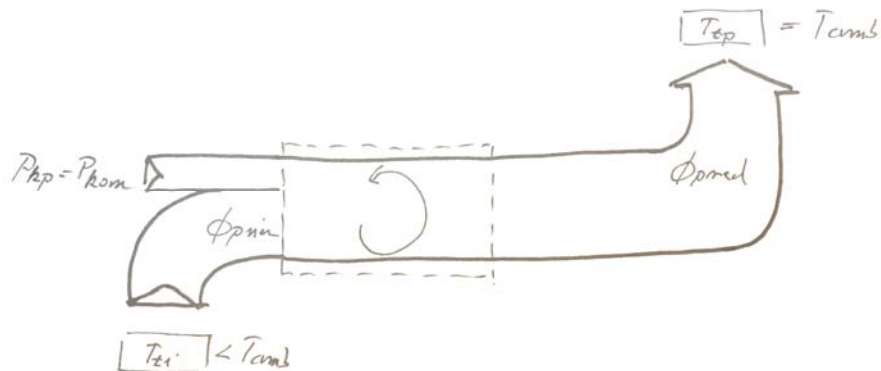


Grassmann -ов (ексергетски)

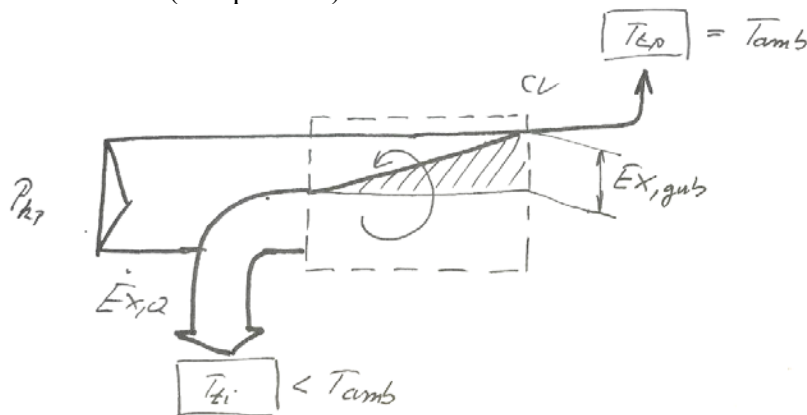


Расхладни уређај

Sankey-ев (енергетски) дијаграм



Grassmann -ов (ексергетски)



Ексергетски степени корисности

Квалитет неког процеса или рада уређаја могуће је описати са:

- Ексергетски степен корисности процеса, односно
- Ексергетски степен корисности рада уређаја.

Ексергетски степен корисности процеса дефинише се као однос очуване ексергије (збира ексергија очуваних након обављеног термодинамичког процеса) и уложене ексергије (збира свих ексергија уложених у термодинамички процес):

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_{oč}}{\sum Ex_{ul}} = \frac{\sum Ex_{ul} - Ex_{gub}}{\sum Ex_{ul}}.$$

Очувана ексергија може да се изрази и као разлика уложене ексергије и губитака ексергије нестале у процесу,

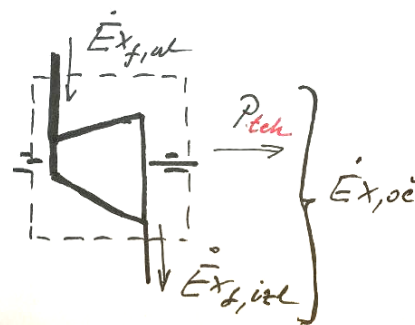
$$\sum Ex_{о\check{c}} = \sum Ex_{ul} - Ex_{gub}.$$

па се ексергетски степен корисности процеса може дефинисати и као:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_{ul} - Ex_{gub}}{\sum Ex_{ul}}$$

Нпр. за турбину приказану на слици ексергетски степен корисности се рачуна:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{teh} + Ex_{f,izl}}{Ex_{f,ul}}.$$



За деснокретни кружни процес важи:

$$\eta_{ex}^{d.kp.} = \frac{\eta_t^{d.kp.}}{\eta_t^{carnot}} = \frac{P_{kp}}{\eta_t^{carnot} \cdot \Phi_{prim}} \leq 1.$$

За левокретни кружни процес важи:

$$\eta_{ex}^{d.kp.} = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{h,C}} \leq 1$$

Ексергетски степен корисности уређаја дефинише се као однос корисне ексергије (збира корисних ексергија у односу на функцију уређаја) и уложене ексергије (збира свих ексергија које се прођу кроз границе уређаја):

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{stv. kor.}}{Ex_{ul}}$$

Нпр. за турбину приказану на слици ексергетски степен корисности се рачуна:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{teh}}{Ex_{f,ul}}.$$

