
AZ EXERGIASZEMLELET HASZNOSÍTÁSA A MINDENNAPOKBAN

*„Minden energia lehet azonos nagyságú,
de nem minden energia lehet azonosan értékes”*
(Marc A. Rosen)

Groniewsky Axel
tudományos segédmunkatárs

Energetikai Szakkollégium előadás
2015. október 1.



ENERGETIKAI GÉPEK ÉS
RENDSZEREK TANSZÉK

VÁZLAT

- Bevezetés
- Veszteségek
- Energia és exergia analízis
- Exergetikai diagnosztika
- Exergoökonómia
- Exergia és környezet



BEVEZETÉS 1 | 2

Exergia szemléletmód alkalmazási területei

■ Energetika

- Erőművi (kör)folyamatok és berendezések
- Kémiai folyamatok
- Desztilláció és sótalánítás
- Ipari és mezőgazdasági rendszerek elemzése
- Műszaki diagnosztika
- ...

■ Környezeti alkalmazások

- Erőforrás hasznosítás és újrahasznosítás
- Exergia alapú életciklus elemzés, fenntarthatóság értékelése
- ...

Exergia szemléletmód alkalmazási területei:

- Közgazdasági alkalmazások
 - Termoökonómia, exergoökonómia
- Egyéb alkalmazások
 - Biológiai rendszerek (embodied energy - emergia - *emjoules*)
 - Társadalmi rendszerek (USA társadalom - 1975)
 - ...



- Mennyiségi veszteségek: energia azon része, amely hasznos munkavégzés nélkül kerül ki az energiaátalakítási folyamatból
 - $W_{\text{mech}} \rightarrow W_{\text{mech}}$ (szivattyúk, kompresszorok, ventilátorok stb.)
 - $W_{\text{mech}} \rightarrow W_{\text{vill}}$ (generátorok)
 - $W_{\text{vill}} \rightarrow W_{\text{mech}}$ (motorok)
 - $W_{\text{vill}} \rightarrow W_{\text{vill}}$ (transzformátorok)
 - $Q_{\text{rend}} \rightarrow Q_{\text{köny}}$ (csővezetékek, externálisan nem adiabatikus hőcserélők stb.)

Számítása: **entalpiaveszteség; exergiaveszteség**

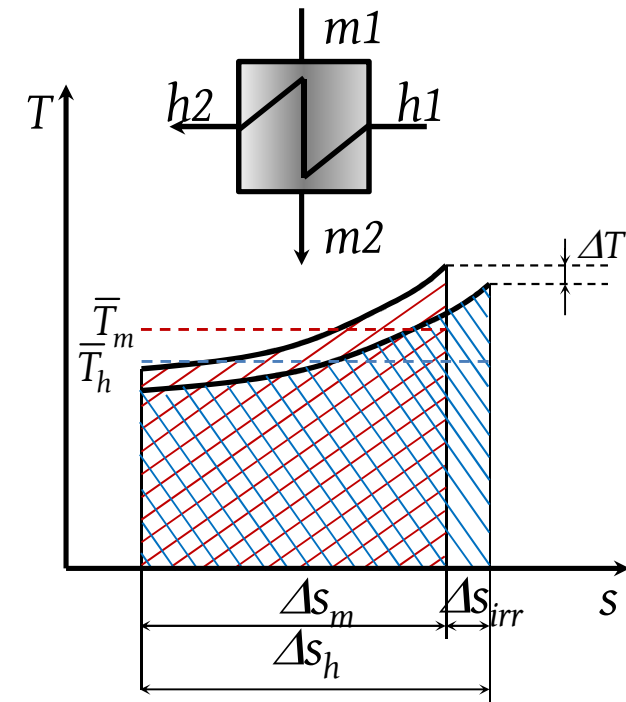
- Minőségi veszteségek: energia intenzív állapotjelzőinek (p,T) értéke csökken, miközben az energia mennyisége nem változik
 - $Q_{\text{rend}} \rightarrow Q_{\text{rend}}$ (tápvíz-előmelegítők, gőzhűtők, levegő előmelegítők stb.)
 - fojtás (szelepek stb.)
 - súrlódás (csővezeték, kompresszor stb.)
 - hőfokkiegyenlítődés (keverő hőcserélők stb.)

Számítása: **entrópiaprodukció; exergiadestrukció (v. exergiarombolás)**



VESZTESÉGEK 1 | 2 | 3

Externálisan adiabatikus hőcserélő



$$\bar{T}_m = \frac{T_{m1} - T_{m2}}{\ln \frac{T_{m1}}{T_{m2}}}; \quad \bar{T}_h = \frac{T_{h2} - T_{h1}}{\ln \frac{T_{h2}}{T_{h1}}}$$

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_{(T)} \cdot dT$$

Energiamérleg

$$\begin{aligned} \dot{H}_{be} &= \dot{H}_{ki} + \dot{H}_{ki,\infty} = \dot{H}_{\Sigma ki} \\ \left. \begin{aligned} \dot{m}_m \cdot (h_{m1} - h_{m2}) - \dot{m}_h \cdot (h_{h2} - h_{h1}) &= \dot{H}_{ki,\infty} \\ \dot{Q}_m &= \dot{Q}_h \end{aligned} \right\} \rightarrow 0 = \dot{H}_{ki,\infty} \end{aligned}$$

Entrópiamérleg

$$\begin{aligned} \dot{S}_{be} &= \dot{S}_{ki} + \dot{S}_{gen} \\ \dot{m}_h \cdot \bar{c}_{ph} \cdot \ln \frac{T_{h2}}{T_{h1}} - \dot{m}_m \cdot \bar{c}_{pm} \cdot \ln \frac{T_{m1}}{T_{m2}} &= \Delta \dot{S}_{irr} \end{aligned}$$

Exergiamérleg

$$\begin{aligned} \dot{E}_{be} &= \dot{E}_{ki} + \dot{E}_v + \dot{E}_d = \dot{E}_{\Sigma ki} + \dot{E}_d \\ \dot{m}_m \cdot (e_{m1} - e_{m2}) - \dot{m}_h \cdot (e_{h2} - e_{h1}) &= \dot{E}_d + \dot{E}_v \end{aligned}$$

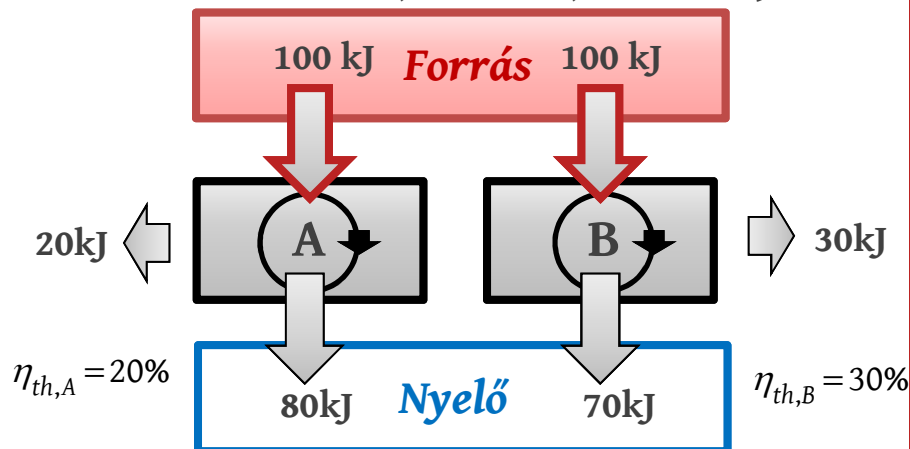
$$\dot{m}_m \cdot \left[(h_{m1} - T_0 \cdot s_{m1}) - (h_{m2} - T_0 \cdot s_{m2}) \right] - \dot{m}_h \cdot \left[(h_{h2} - T_0 \cdot s_{h2}) - (h_{h1} - T_0 \cdot s_{h1}) \right] = \dot{E}_d + \dot{E}_v$$

$$\underbrace{\dot{m}_m \cdot (h_{m1} - h_{m2}) - \dot{m}_h \cdot (h_{h2} - h_{h1})}_{\dot{E}_v} + \underbrace{T_0 \cdot \left(\dot{m}_h \cdot \bar{c}_{ph} \cdot \ln \frac{T_{h2}}{T_{h1}} - \dot{m}_m \cdot \bar{c}_{pm} \cdot \ln \frac{T_{m1}}{T_{m2}} \right)}_{\dot{E}_d} = \dot{E}_d + \dot{E}_v$$



VESZTESÉGEK 1 | 2 | 3

Termikus hatásfok - első főtétel alapú



munkaszolgáltató

$$\eta_{th} = \frac{Q_{be} - Q_{el}}{Q_{be}} = 1 - \frac{Q_{el}}{Q_{be}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{be}}$$

hűtő

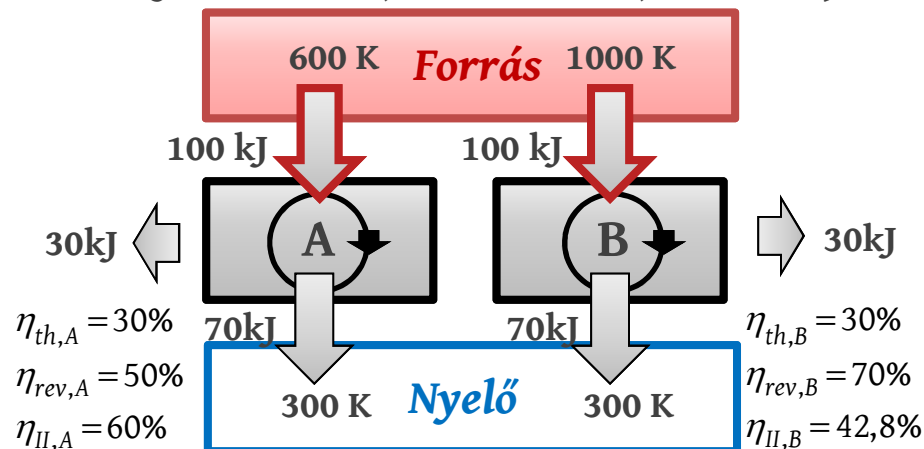
$$COP_{Ref} = \frac{Q_{elvont}}{W_{net,be}}$$

$$COP_{HP} = \frac{Q_{leadott}}{W_{net,be}}$$

$$\eta_I = \frac{\text{hasznos energia}}{\text{befektetett energia}}$$

Első főtétel alapú hatásfok hátránya, hogy nem utal az ideálisan elérhető legmagasabb hatásfokra!

Exergetikai hatásfok - második főtétel alapú



munkaszolgáltató

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,rev}}$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{W_{net,rev}}$$

hűtő

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$$

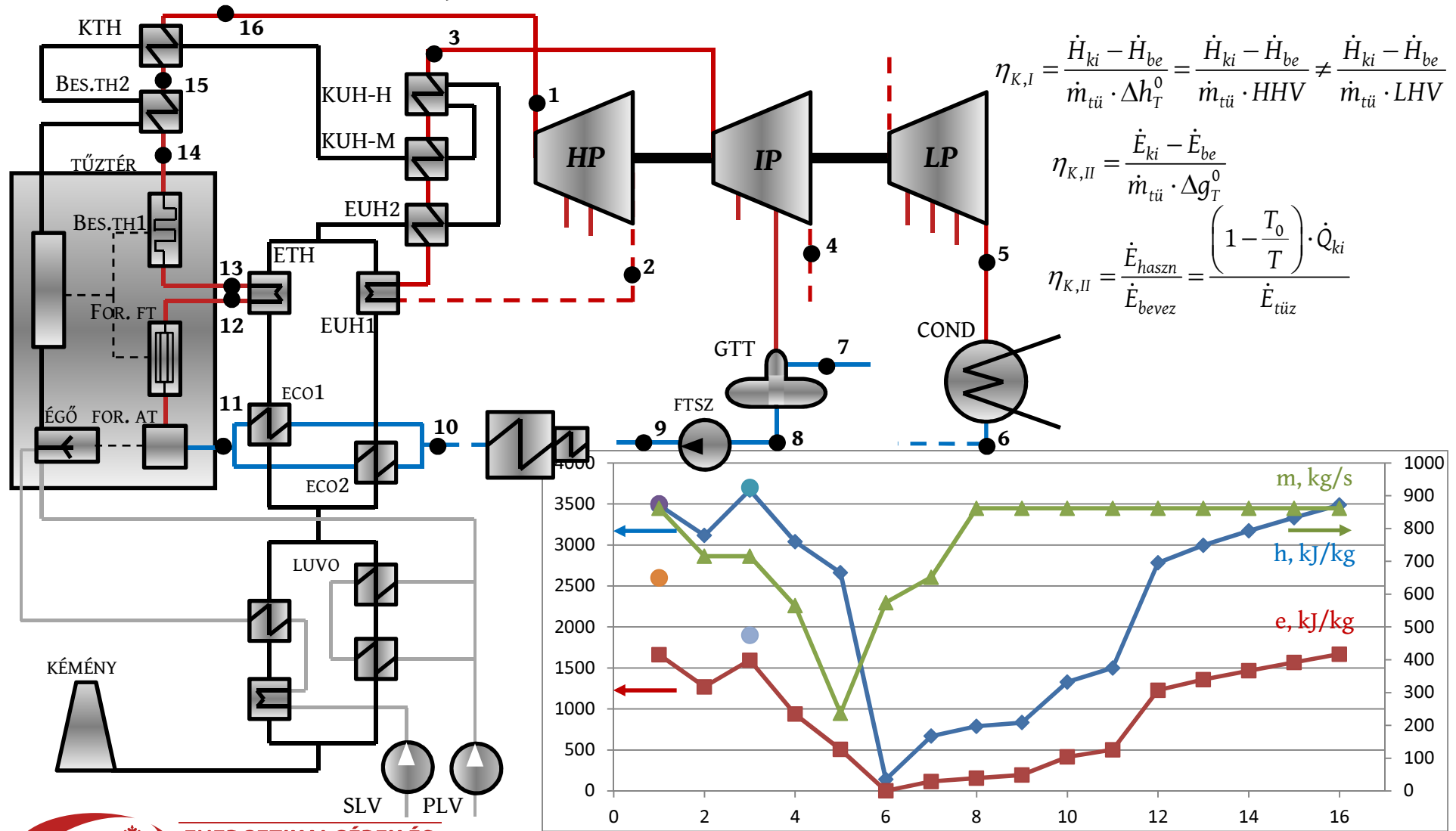
$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_{net}}$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_{hasznos}}{\dot{E}_{befektetett}} = 1 - \frac{\dot{E}_d}{\dot{E}_{befektetett}}$$



ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

Széntüzeléses ultra-szuperkritikus 1100 MW-os kondenzációs blokk



$$\eta_{K,I} = \frac{\dot{H}_{ki} - \dot{H}_{be}}{\dot{m}_{tü} \cdot \Delta h_T^0} = \frac{\dot{H}_{ki} - \dot{H}_{be}}{\dot{m}_{tü} \cdot HHV} \neq \frac{\dot{H}_{ki} - \dot{H}_{be}}{\dot{m}_{tü} \cdot LHV}$$

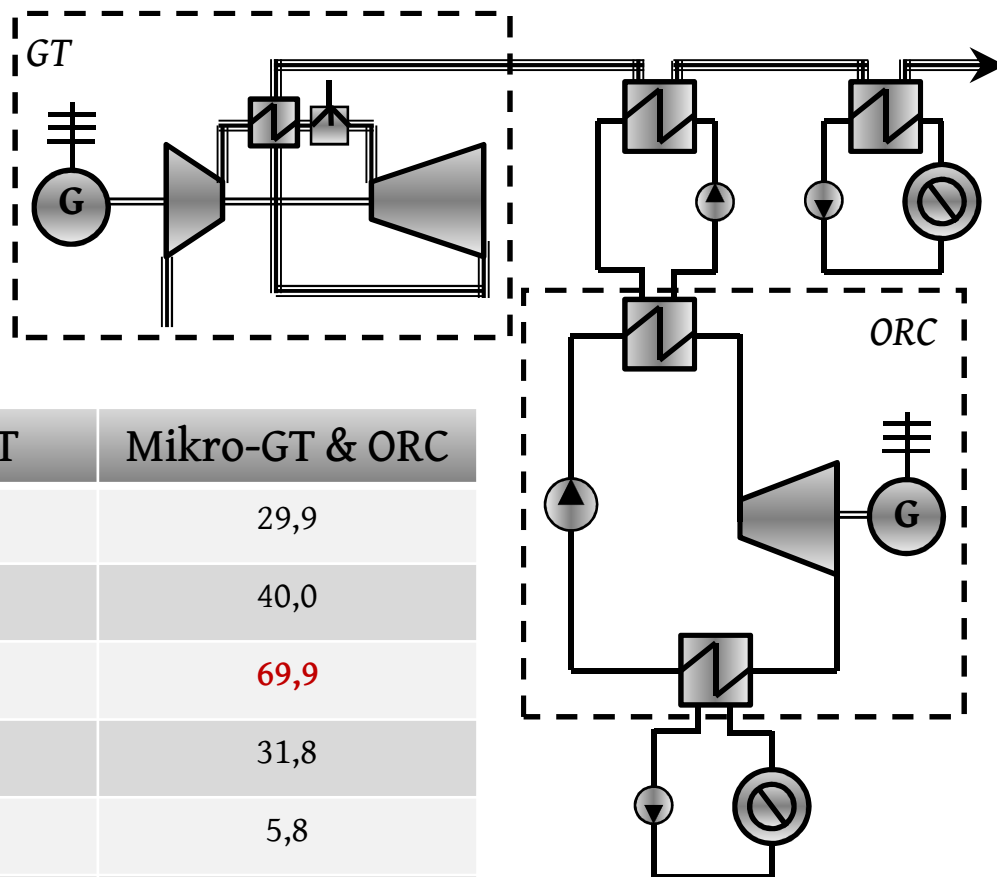
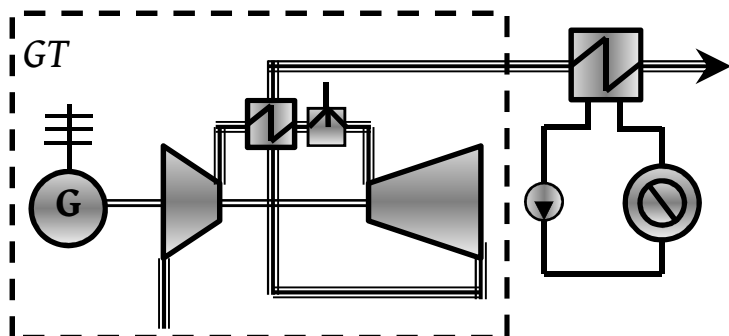
$$\eta_{K,II} = \frac{\dot{E}_{ki} - \dot{E}_{be}}{\dot{m}_{tü} \cdot \Delta g_T^0}$$

$$\eta_{K,II} = \frac{\dot{E}_{haszn}}{\dot{E}_{bevez}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \frac{\dot{Q}_{ki}}{\dot{E}_{tüz}}$$



ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

Kapcsolt mikro-gázturbina | Kapcsolt mikro-gázturbina ORC-vel



Paraméter	Mikro-GT	Mikro-GT & ORC
Villamás részhatásfok, %	27,5	29,9
Termikus részhatásfok, %	42,6	40,0
Mennyiségi hatásfok, %	70,1	69,9
Exergetikai villamás részhatásfok, %	29,3	31,8
Exergetikai termikus részhatásfok, %	6,2	5,8
Exergetikai mennyiségi hatásfok, %	35,5	37,6

Eredmények az önfogyasztást is magukban foglalják

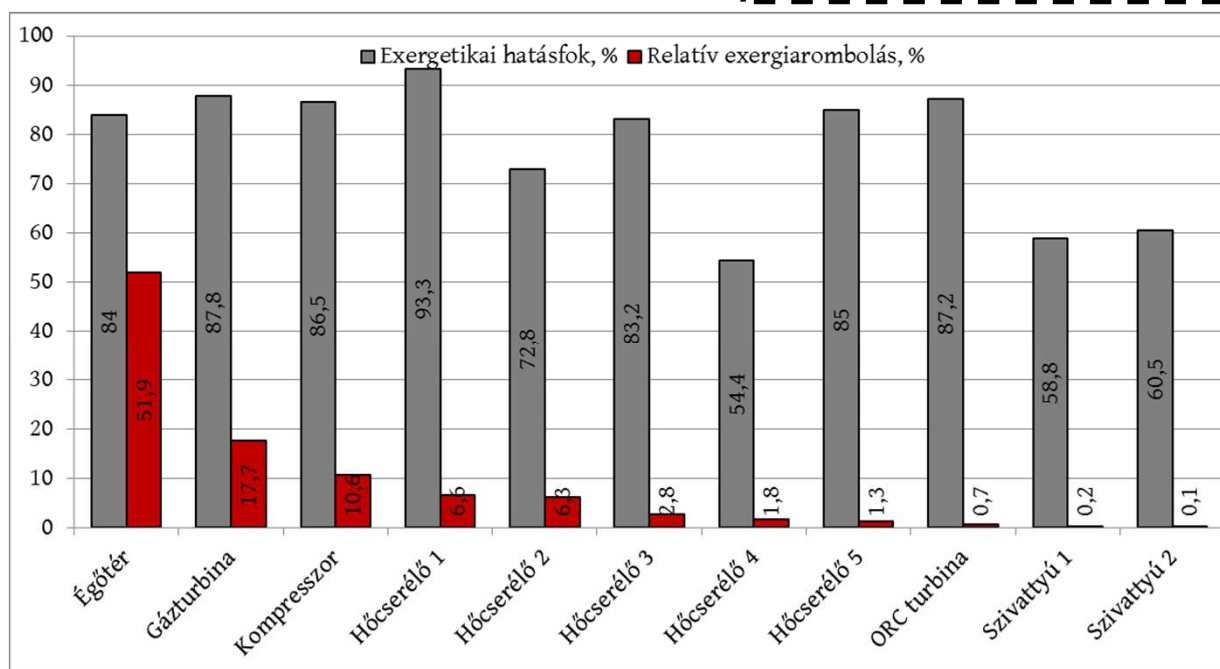
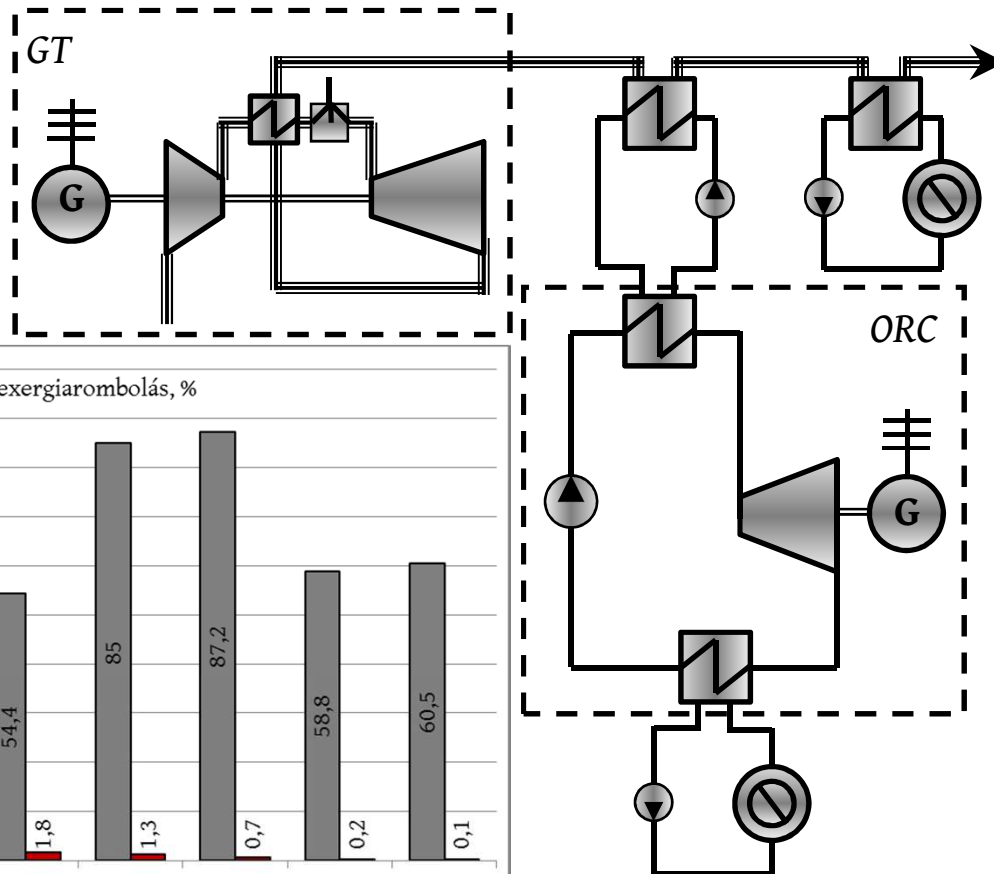


ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

Kapcsolt mikro-gázturbina ORC-vel – exergetikai hatásfok és exergia rombolás

Exergiarombolással összefüggő folyamatok sorrendben:

- kémiai reakciók;
- hőcsere;
- súrlódás.



ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

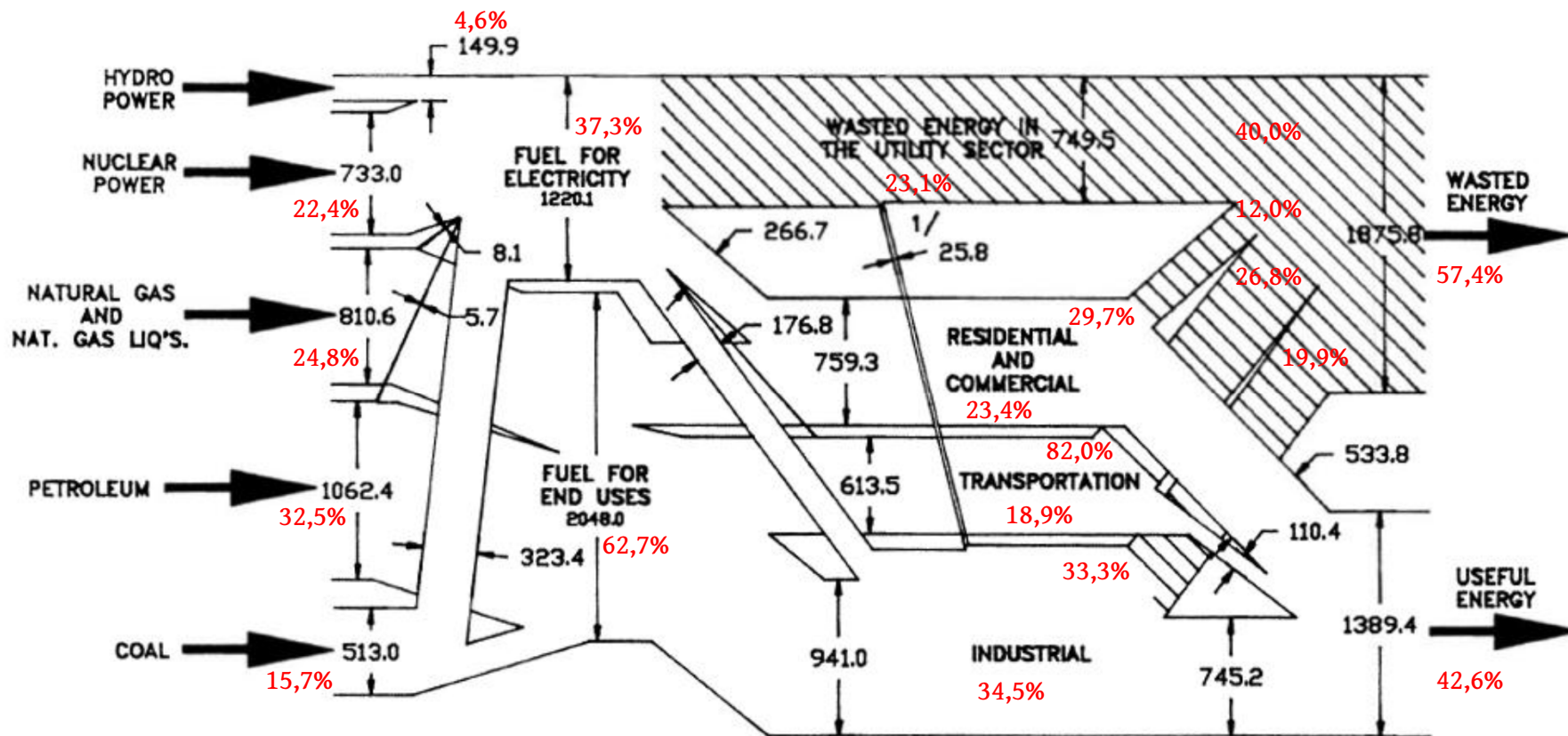
Energiaáramok (PJ) - ONTARIO, CANADA – 1987

- 13,5 millió ember
- 1 millió km²
- Kanada ipari központja
- Jelentős áramszolgáltató
 - Nukleáris erőmű
 - Vízierőmű
 - Fosszilis erőmű



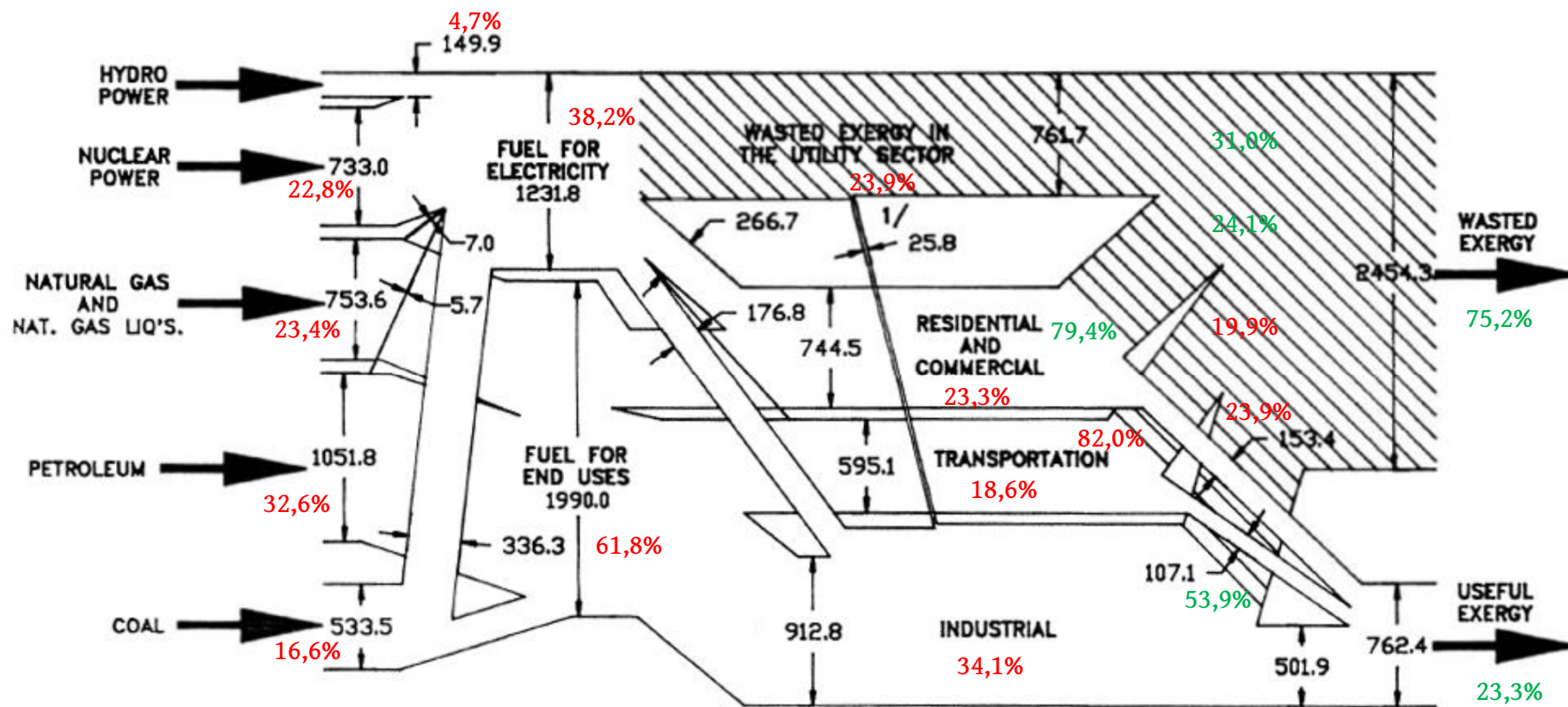
ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

Energiaáramok (PJ) - ONTARIO, CANADA - 1987



ENERGIA ÉS EXERGIA ANALÍZIS 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6

Exergiaáramok (PJ) - ONTARIO, CANADA - 1987



Költségmérleg

$$\sum_e (c_e \cdot \dot{E}_e)_k + c_{w,k} \cdot \dot{W}_k = c_{q,k} \cdot \dot{E}_{q,k} + \sum_i (c_i \cdot \dot{E}_i)_k + \dot{Z}_k$$

c : exergiák fajlagos egységköltsége
(\$/GJ; ¢/kWh)

E : exergia áram (kW)

W : teljesítmény (kW)

Z : CI és O&M költségáramok összege (\$/sec)

$$\dot{Z}_k = \frac{(CCs + O \& M)}{(PEC_{tot} \cdot \tau)} \cdot PEC_k$$

CCs : egyéb állandó költségek árama (\$/a)

$O \& M$: üzemeltetés és karbantartás
költségárama (\$/a)

PEC : berendezés beruházásának
költségárama (\$/a)

τ : üzemidő (h/a)

Segedegyenletek:

- segédegyenlet felírása csak melléktermékre, nem pedig a főtermékre történik;
- adott berendezésben a fajlagos exergia valamennyi termékáramhoz ugyanazon a fajlagos költségen kerül hozzárendelésre;
- a termék fajlagos költsége csak abban az esetben változik, ha exergiaáramot rendelünk hozzá.



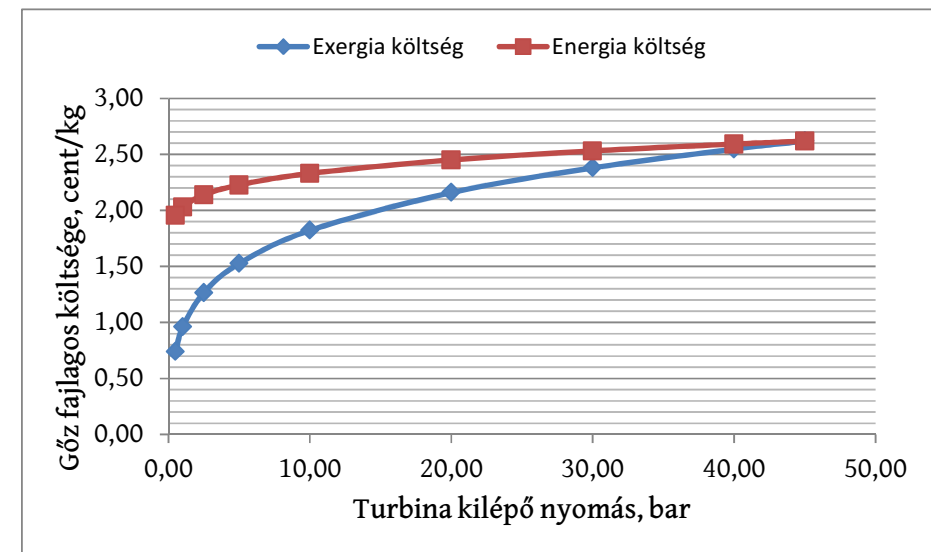
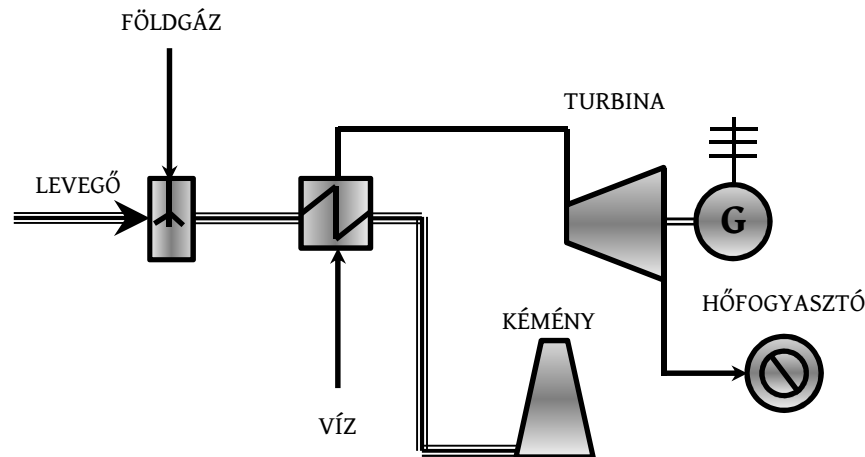
Energiaköltség vs. exergiaköltség

Mennyiségi veszteségek: entalpiaveszteség, kJ $\rightarrow$ költsége \$/kJ

exergiaveszteség, kJ $\rightarrow$ költsége \$/kJ

Minőségi veszteségek: entrópiatermelés, kJ/K $\rightarrow$ költsége (\$·K)/kJ

exergiadestrukció, kJ $\rightarrow$ költsége \$/kJ



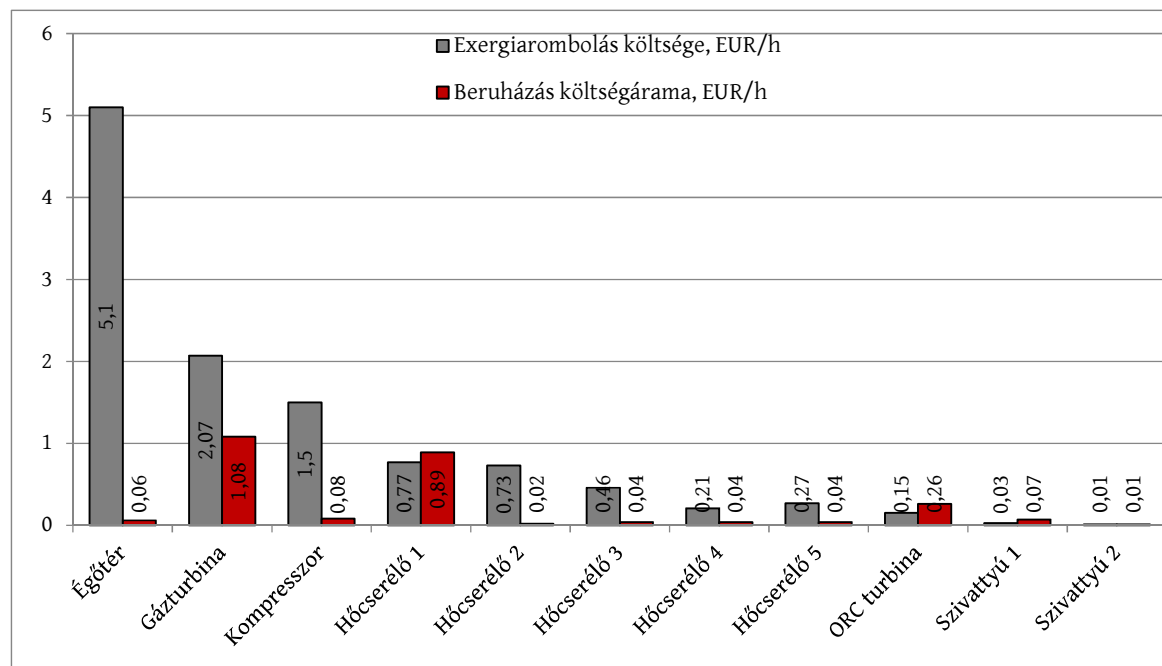
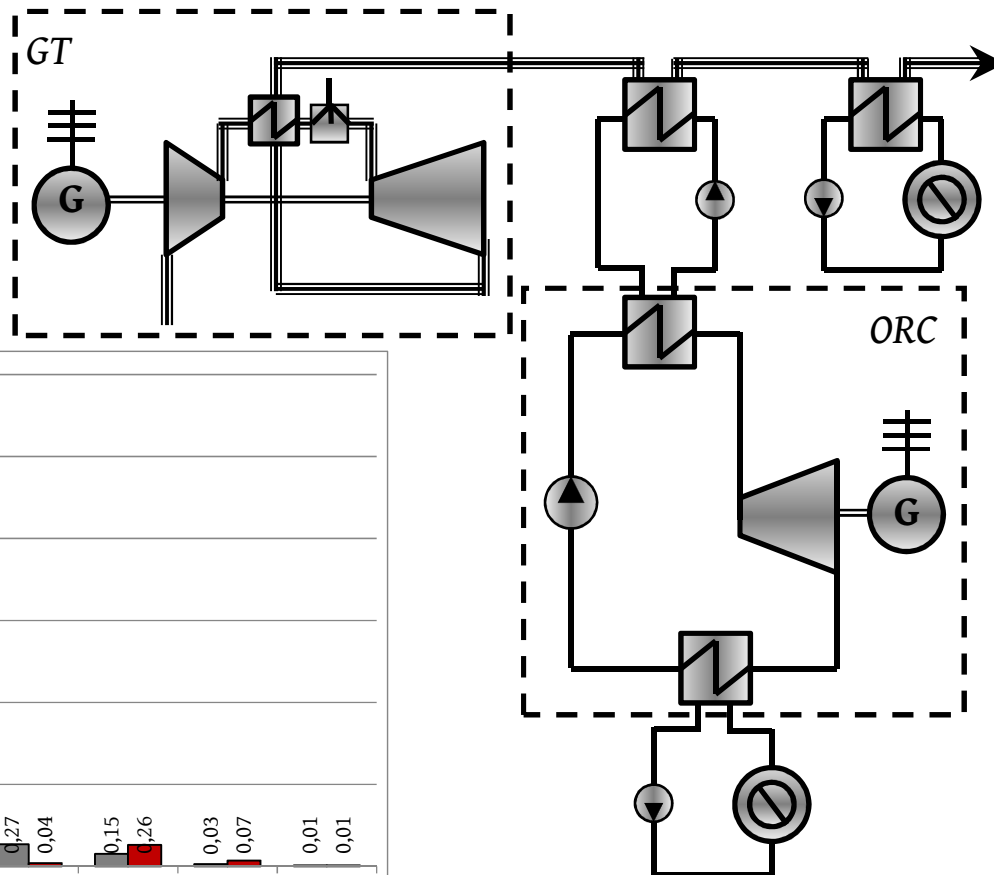
EXERGOÖKONÓMIA 1 | 2 | 3

Kapcsolt mikro-gázturbina ORC-vel – exergoökonómiai értékelés

PEC meghatározása költségegyen-
értékes módszerrel történik
(Levelized Cost Method)

$$C_{e,GT}=6,98\text{c/kWh}; C_{Q,GT}=14,88\text{c/kWh}$$

$$C_{e,ORC}=14,06\text{c/kWh}; C_{Q,ORC}=11,66\text{c/kWh}$$



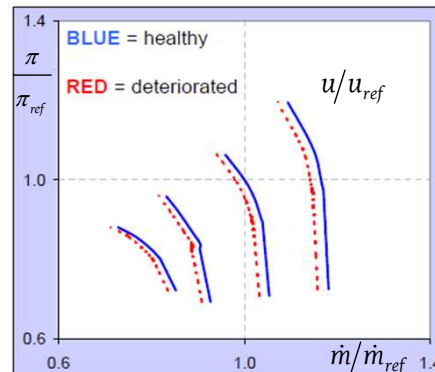
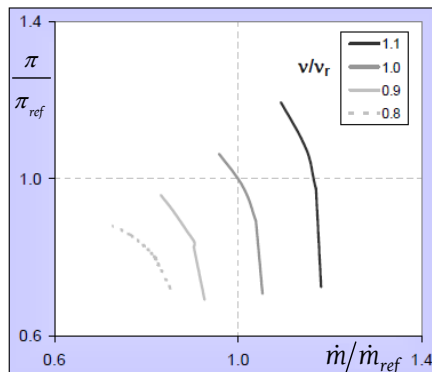
DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREK

Gas Path Analysis (GPA)

Erőmű üzemi állapotát olyan jellemző paraméterekkel határozza meg, melyek egyben a gépek műszaki állapotát tükrözik.

Paraméter: műszaki állapotára érzékeny; terhelésváltoztatásra érzéketlenek.

$$F(X_1 \dots X_n) = \sum_{i=1}^{N_m} w_i \cdot \left(\frac{Q_{m,c} - Q_m}{Q_m} \right)_i^2$$



Meghibásodás helyének és nagyságának feltárása!

Exergetic Diagnostics (EDA)

Működési zavarok hatásvizsgálata exergetikai és exergoökonómiai jellemzőkkel

Állandó forrás (F) mellett:

$$\Delta I_{\Delta\eta,j} = - \sum_{i=1}^N \Delta \eta_{ji} \cdot F_j \quad \Delta P_j = \sum_{i=1}^N (h_i^c \Delta \eta_{ji}) \cdot F_j$$

Állandó teljesítmény/termék (P) mellett:

$$\Delta I_{\Delta k,j} = \sum_{i=1}^N \Delta k_{ji} \cdot P_j \quad \Delta F_j = \sum_{i=1}^N (k_i^c \cdot \Delta \eta_{ji}) \cdot F_j$$

$\Delta I_{\Delta\eta,j}$ - j. komponens irreverzibilitás változása az exergetikai hatásfok változása miatt

$\Delta P_{\Delta\eta,j}$ - j. komponens hozzájárulásának változása a teljes rendszer termelésének (P_{TOT}) változásához

A meghibásodás a rendszer többi elemére gyakorolt hatásának feltárása
(termelés csökkenés, irreverzibilitás növekedés)



EXERGIA ÉS A KÖRNYEZET

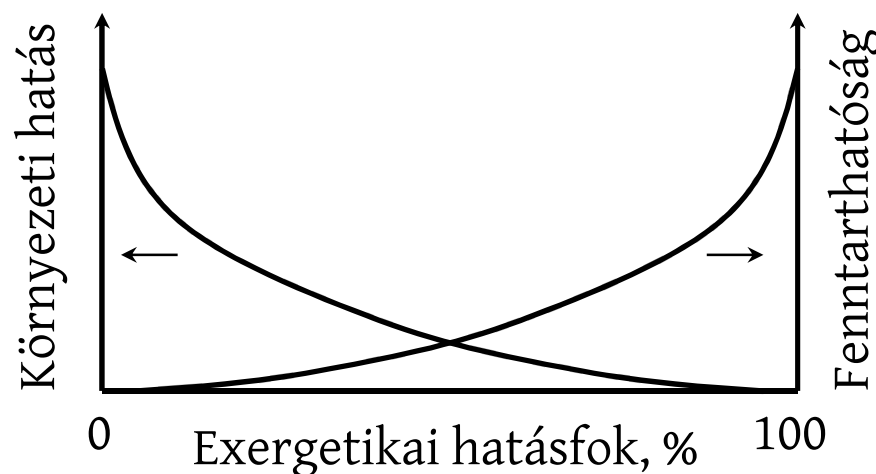
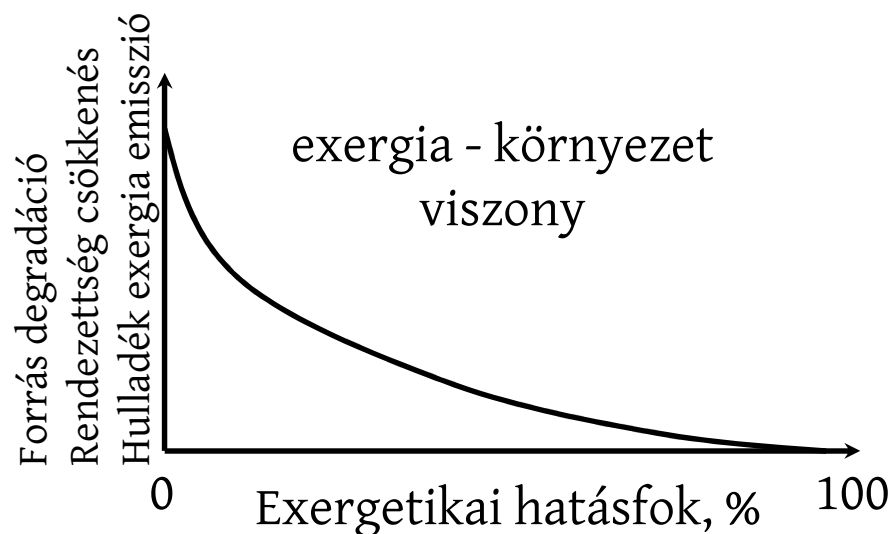
Exergia a környezeti hatás termodinamikai indikátora

Környezetbe jutó exergia azonos a szennyezéssel (*csak bizonyos esetekben!*)

A szennyezést az ember vagy a természet oldaláról kell vizsgálni?

Mi a szennyezés ökológiai költsége?

1. a szennyezés mértékével megegyező exergia
2. a kármentesítés mértékével megegyező exergia

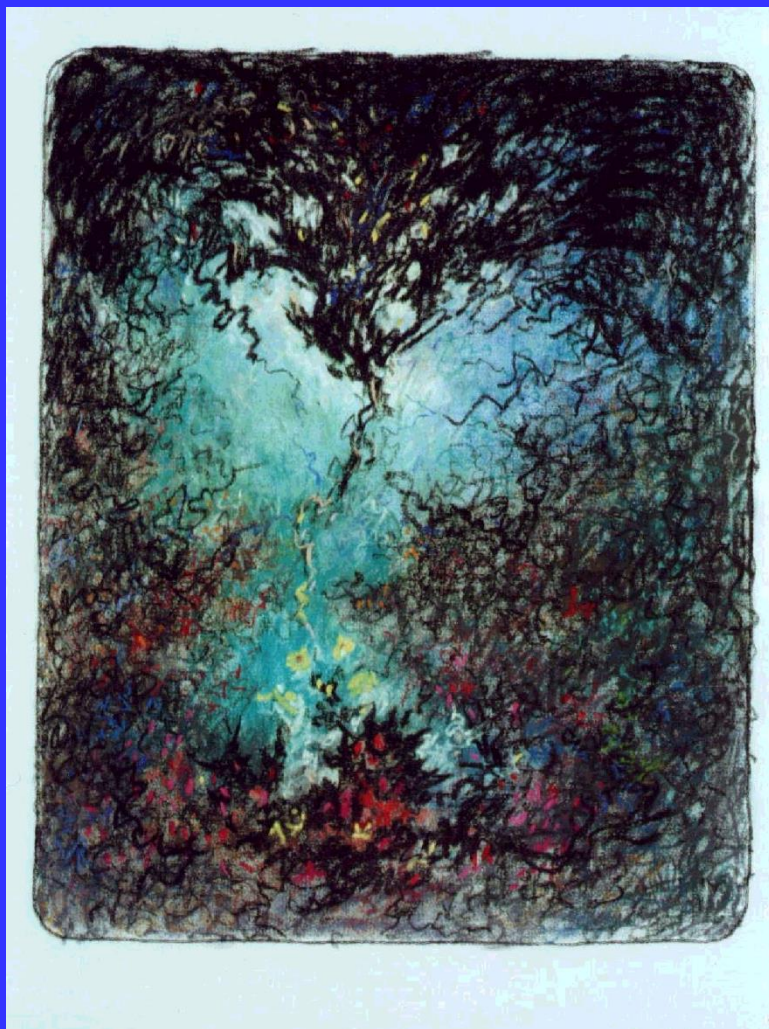


IRODALOMJEGYZÉK

1. Sciubba E., Wall G.: A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004, Thermodynamics, 10/1/1-26, 2007.
2. Dr. Szondi Egon János: Az exergia-szemlélet hazai elterjedésének gátjai, ENERGIAGAZDÁLKODÁS 56. évf. 2015. 1-2. szám
3. L. Wang, Y. Yang, C. Dong, Z. Yang, G. Xu, L. Wu: Exergoeconomic Evaluation of a Modern Ultra-Supercritical Power Plant, Energies 2012, 5, 3381-3397; doi:10.3390/en5093381
4. Marc A. Rosen: Correlating thermodynamics and economic investments to improve the rationale for energy research, 12th Joint European Thermodynamics Conference, Brescia, July 1-5, 2013
5. Bihari Péter: Erőművek, elektronikus jegyzet, Budapest, 2002,
6. Yunus A. Chengel, Michael A. Boles: Thermodynamics, An engineering approach, Mcgraw-Hill College; 5th edition, 2004.
7. Dr Audrius Bagdanavicius: Exergy and Exergoeconomic Analysis - Methods for Evaluation of Energy Systems, University of Leicester, 2013.
8. Groniewsky A.: Exergoeconomic analysis of thermodynamic systems, 11th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection, June 03-05, Balatonfüred, Hungary, 2013.
9. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.: Thermal Design and Optimization, Wiley, NewYork, 1996.
10. Groniewsky Axel: Erőművek termodinamikai modelljeinek exergoökonómiai optimalása részecskeraj intelligenciával, PhD dolgozat, Budapest, 2015.
11. Marc A. Rosen: Application of Exergy-based Methods for Technical, Economic and Environmental Assessments of Nuclear Cogeneration, University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Canada, 2013.
12. Carraretto C., Stoppato A., Pinelli M., Venturini M.: Gas path analysis and exergetic diagnostics for gas turbine health state determination, University of Padova, University of Ferrara, 2003.

Köszönöm a figyelmet!





Huller Ágoston:
Ébredj, mert jön a fekete entrópia!

AZ EXERGIASZEMLELET HASZNOSÍTÁSA A MINDENNAPOKBAN

Martinás Katalin
ELTE

kati.martinas@gmail.com

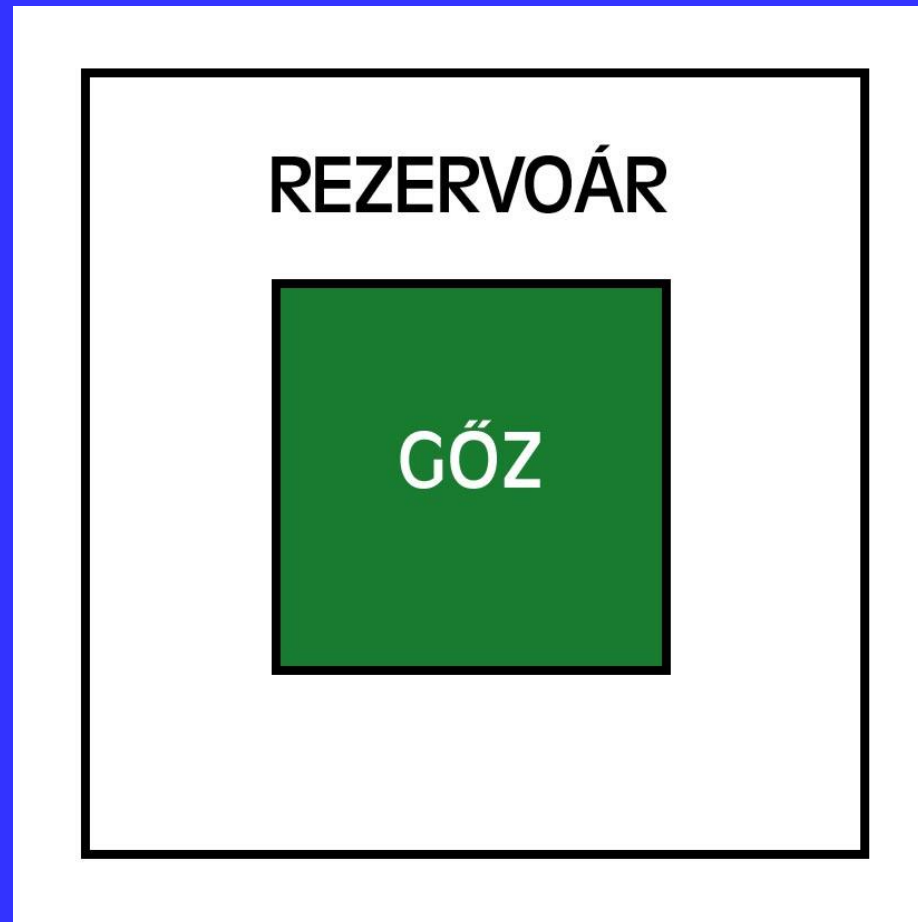
EXERGIA

Egy rezervoárban lévő rendszerből kinyerhető
maximális mechanika munka

TEMATIKA

- Exergia kiszámítása
- Exergia értelmezésének problémái
 - Tudomány
 - Laikus
- Termodinamika újragondolása
 - extrópia-negentrópia
 - extrópia - exergia

EXERGIA KISZÁMÍTÁSA



EXERGIA

- Rezervoár

$$U^*, T, p$$

- Gőz

$$U, T+dT, p+dp$$

- Maximális mechanikai munka

$$dL = dQ \, dT/T - dp^* dV$$

$$dQ/T \geq dS$$

EXERGIA

$$B = (T - T^*)S - (p - p^*)V$$

TULAJDONSÁGOK:

$$B \geq 0$$

$$dB/dt = dT/T dQ/dt - sp$$

ahol sp az entrópiaprodukció

ENERGIA

A rezervoár és a gőz teljes energiája interpretálható, mint a felhasználható és a nem felhasználható energia összege:

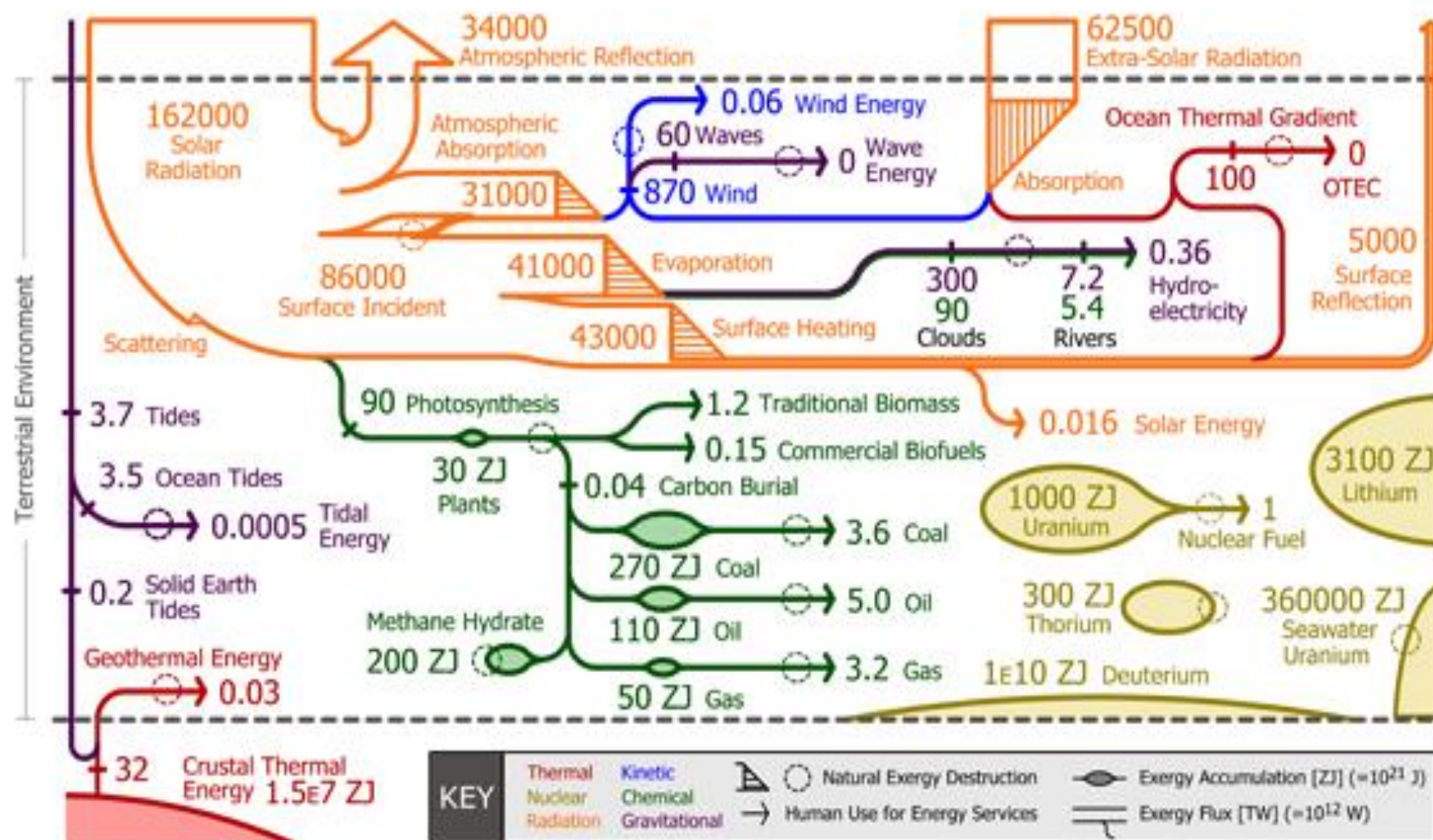
$$E = U^* + U = B + A$$

$$A \geq 0$$

ALKALMAZÁS -REZERVOÁR

Mérnöki gyakorlat

Ipari ökológia



Exergy is the useful portion of energy that allows us to do work and perform energy services. We gather exergy from energy-carrying substances in the natural world we call energy resources. While energy is conserved, the exergetic portion can be destroyed when it undergoes an energy conversion. This diagram summarizes the exergy reservoirs and flows in our sphere of influence including their interconnections, conversions, and eventual natural or anthropogenic destruction. Because the choice of energy resource and the method of resource utilization have environmental consequences, knowing the full range of energy options available to our growing world population and economy may assist in efforts to decouple energy use from environmental damage.

EXERGIA ÉRTELMEZÉSE

„Exergy is the useful portion of energy that allows us to do work and perform energy services.”

Igaz a gőz+rezervoár rendszerre!

Nem igaz csak a gőzre!

EXERGIA PROBLÉMA

Nem lehet értelmezni a rezervoár fogalma nélkül.

Nem lehet termodinamikai ismeret nélkül exergia szemléletet adni!

TERMODINAMIKA

MODERN

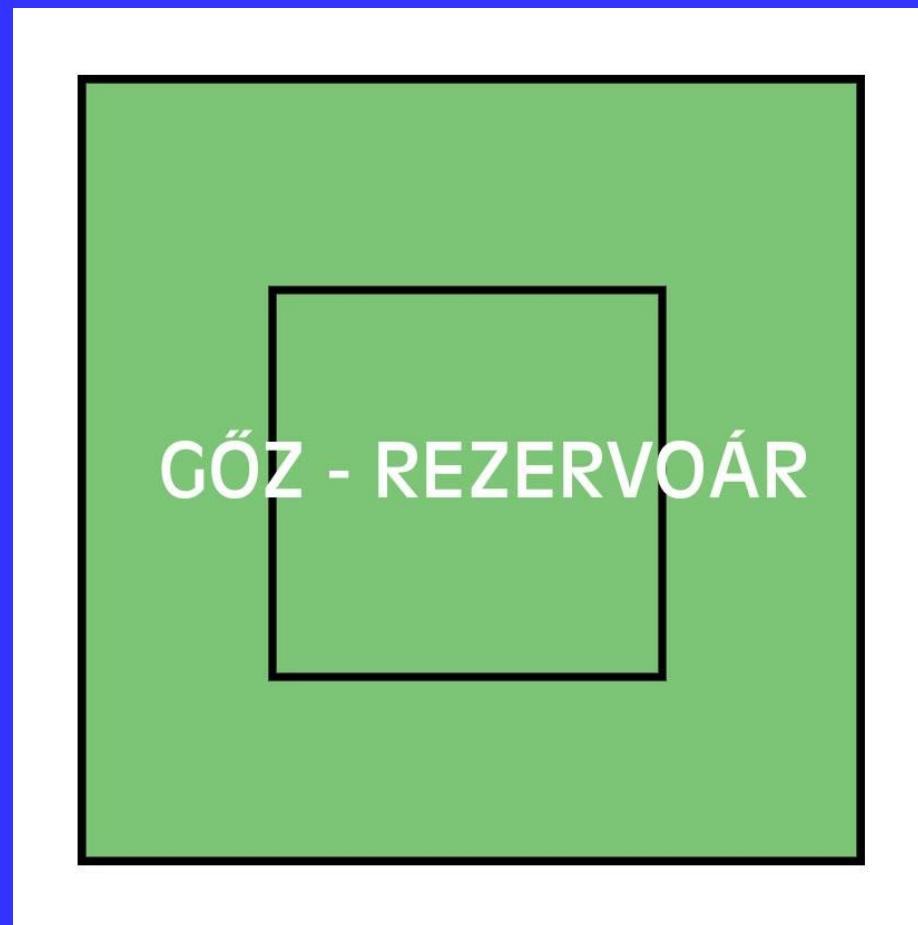
(Egyensúlyi,
Nemegyensúlyi,
Irreverzibilis..)

Exergia nem állapotjelző

ÚJRAGONDOLT

Exergia állapotjelző

ÚJ SZEMLÉLET



G-R jellemzői

$E(=U^*+U)$, N^*,N , $V(=V^*+V)$, dT,dp

Az entrópia

$S = S(E,V,N^*,N,dT,dp)$

$S = S(E,V,N^*) - C/2 (dT/T)^2$

ahol C a gőz hőkapacitása

EXTRÓPIA

$$P = S(E, V) - S = C/2 (dT/T)^2$$

entróphiahiány

rendezettség

negentrópia -Schrödinger

EXERGIA

Állandó hőmérsékletű rezervoárban

$$B = T^* P$$

ETIKUS-E DOLGOZNI?

Entrópia – zárt rendszer – nem etikus

- nyílt rendszer – maximumot kell

Extrópia - **Kötelező**, de a korlátokat ismerni kell!

Irodalom

- Z. Randt ((1956). "Exergie, ein neues Wort für "Technische Arbeitsfähigkeit" (Exergy, a new word for "technical available work)"). Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 22: 36–37
- Jászay T.: Heller László iskolateremtő, tudósi oktatói öröksége, Magyar Energetika, 1995/6, p. 8-11.
- Halász Györgyné, Kalmár Tünde, Különböző hőtermelővel ellátott fűtési rendszerek exergetikai összehasonlítása I. rész Magyar Épületgépészet, LVI. évfolyam, 2007/12. szám
- Robert U. Ayres ; Leslie Ayres and Katalin Martinás, Eco-Thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis, 1996/04/EPS , Energy 23 (5):355-363
- Herman Edit, Kádár József, Martinás Katalin, Bezegh András: A kukorica alapú bioetanol magyarországi előállításának exergiaelemzése, Fizikai Szemle, 2013. 4.szám, 125.