

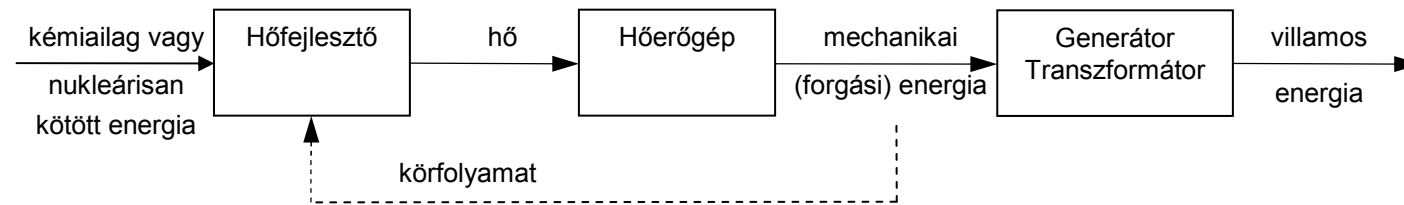
6. témakör

Villamosenergia-termelés hőerőművekben

Tartalom

- 1. Fosszilis tüzelőanyagú gőzerőművek.**
- 2. Gázturbinás erőművek.**
- 3. Kombinált gáz-gőz erőművek.**
- 4. Tüzelőanyag-cellák.**

A villamosenergia-termelés folyamata hőerőművekben



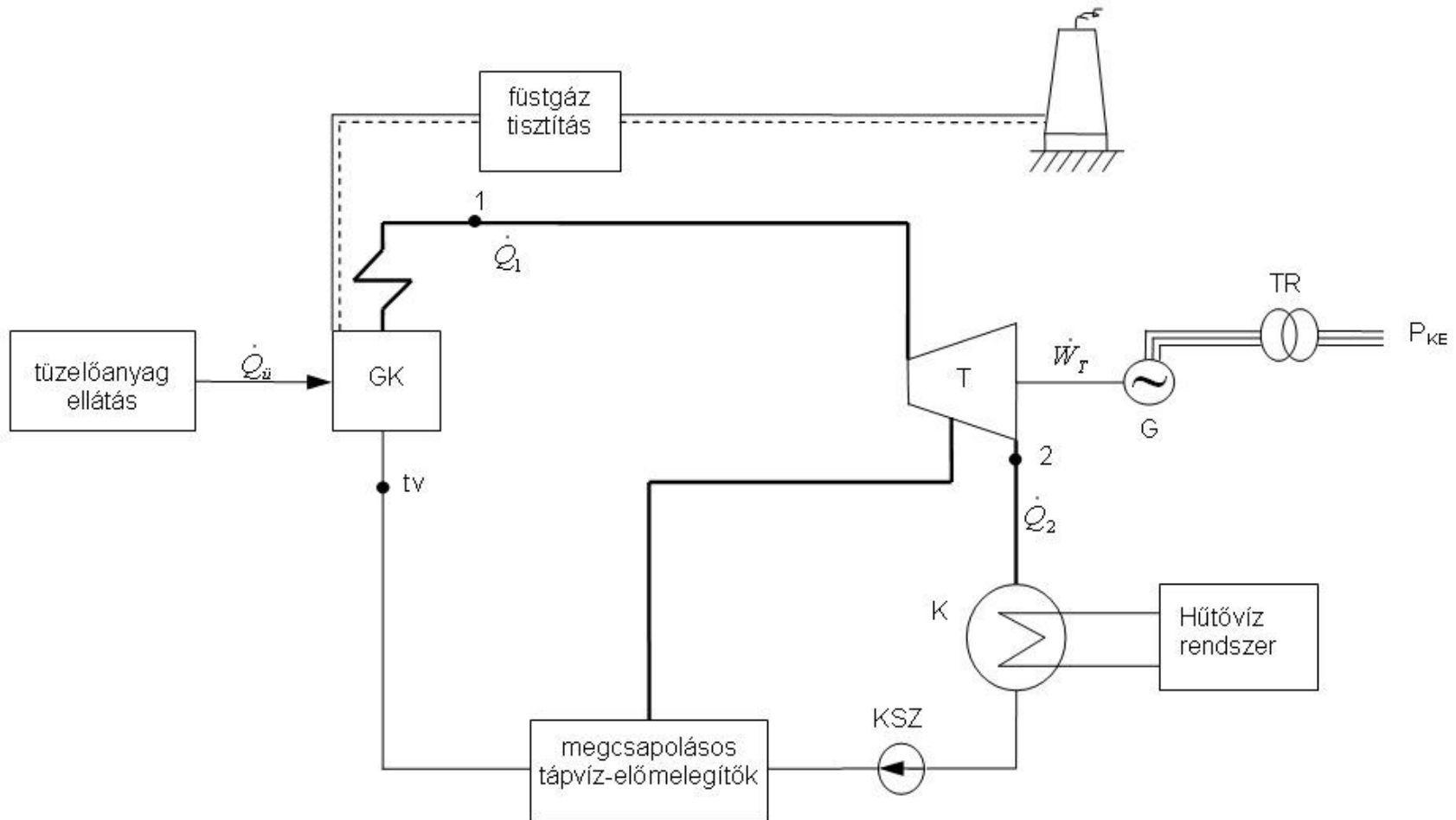
Csoportosítás

- **A felhasznált végenergia 30-40 %-a villamos energia.**
- **Tüzelőanyag: C, CH, nukleáris,**
- **Munkaközeg: vízgőz, füstgáz,**
- **Hőerőművek: gőz, gázturbinás, kombinált gáz-gőz, (gázmotoros).**

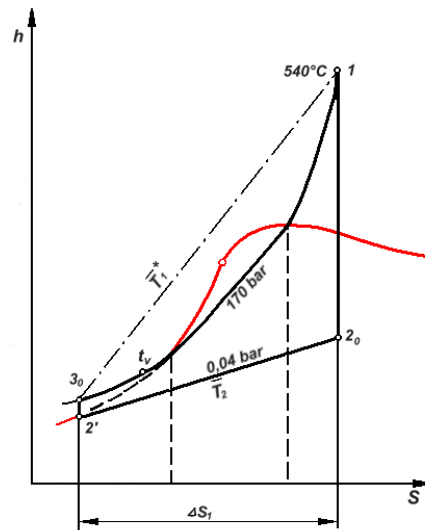
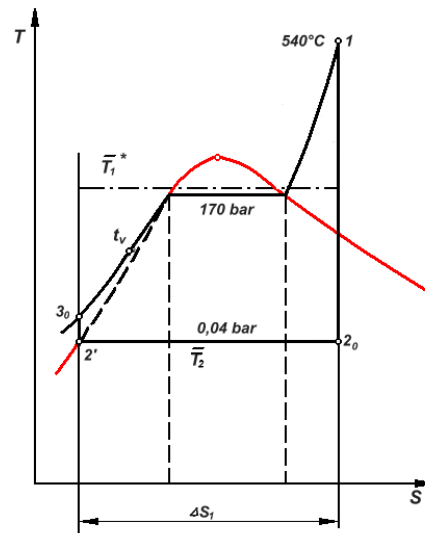
6.1.

**Fosszilis tüzelőanyagú
gőzerőművek**

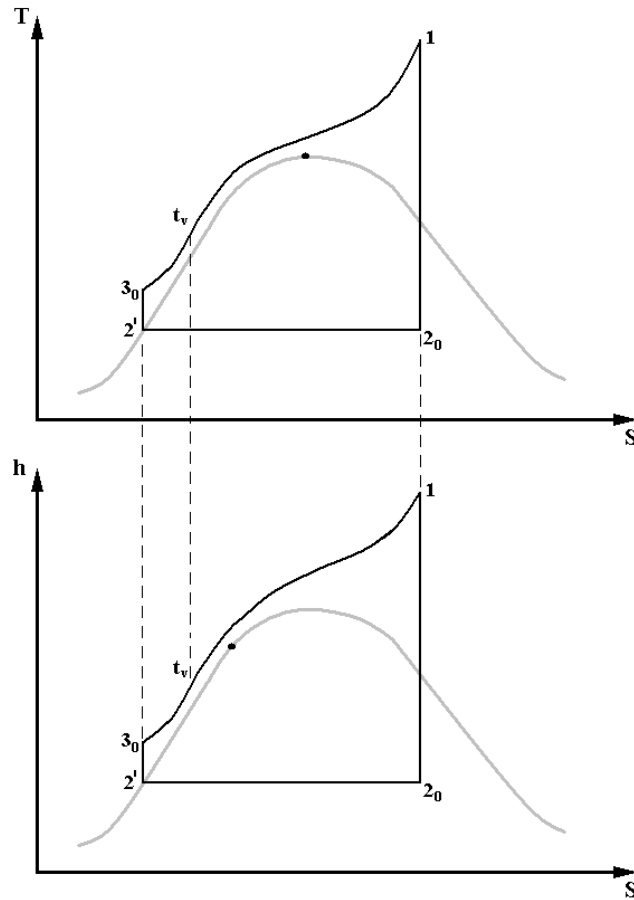
Kapcsolás



Szubkritikus gőzkörfolyamat



Szuperkritikus gőzkörfolyamat

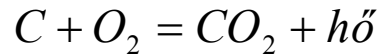


1. Főberendezések és folyamatok

- ***Gőzkazán (GK, tv-1): a kémiaiilag kötött energia felszabadítása a tüzelőanyag elégetésével, a keletkező nagy hőmérsékletű (800-1500 °C) láng és füstgáz lehűtése (füstgázoldal), a vízgőz munkaközeg felmelegítése, elgőzölögtetése, túl- és újrahevítése (vízgőzoldal).***
- **Tüzelőanyagok:**
 - különböző szenek, különböző tüzelési módokkal,
 - kőolaj-finomítás maradékai,
 - földgáz (inertes gáz).

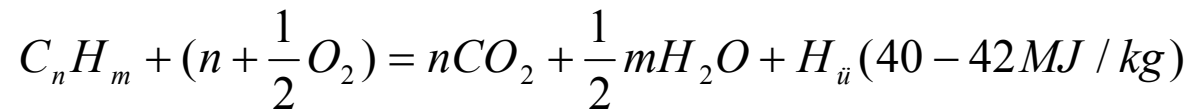
1.1. Gőzkazán

- **Tüzelés (108 ill. 58 g CO₂/MJ):**



$$12 \text{ g / mol} + 32 \text{ g / mol} = 44 \text{ g / mol}$$

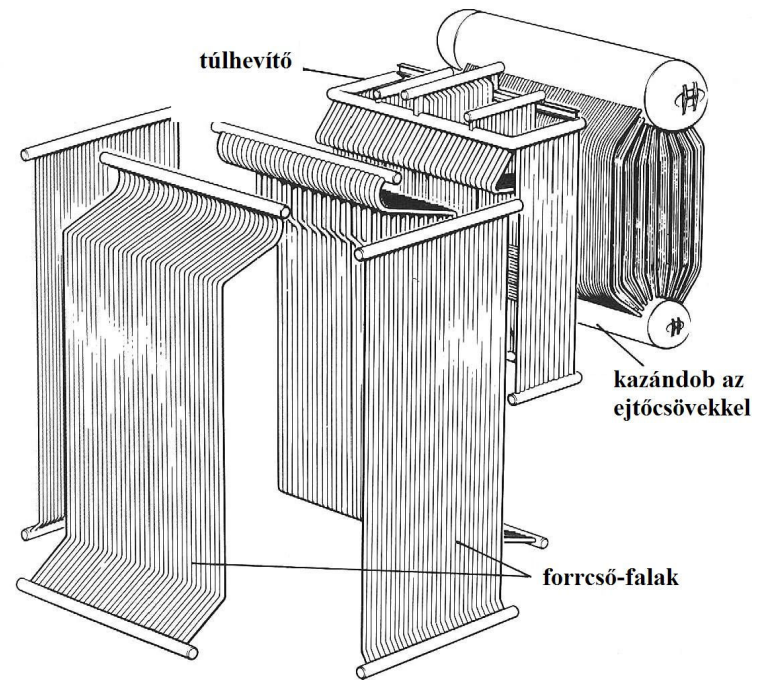
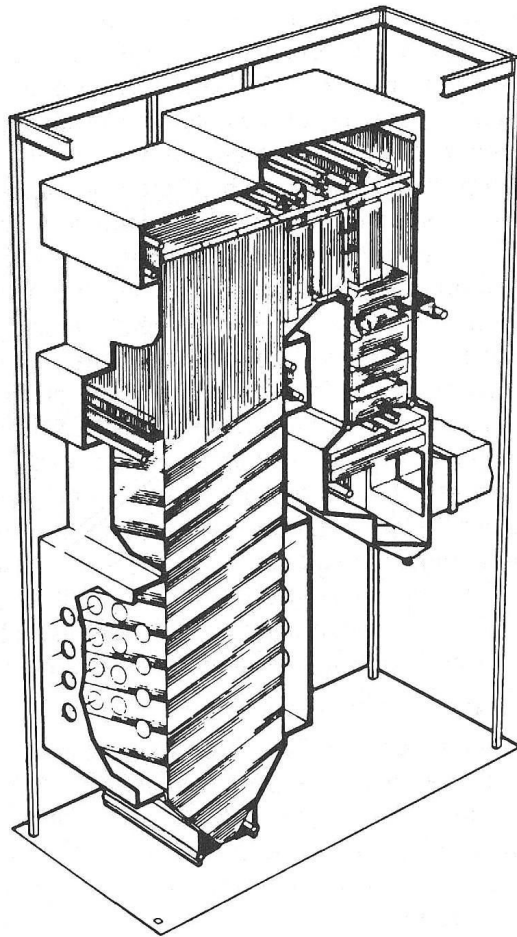
$$1 \text{ kg} + 2,66 \text{ kg} = 3,66 \text{ kg} (100\%) + H_{\ddot{u}} (C = 33,8; \text{szén} : 6 - 28 \text{ MJ / kg})$$



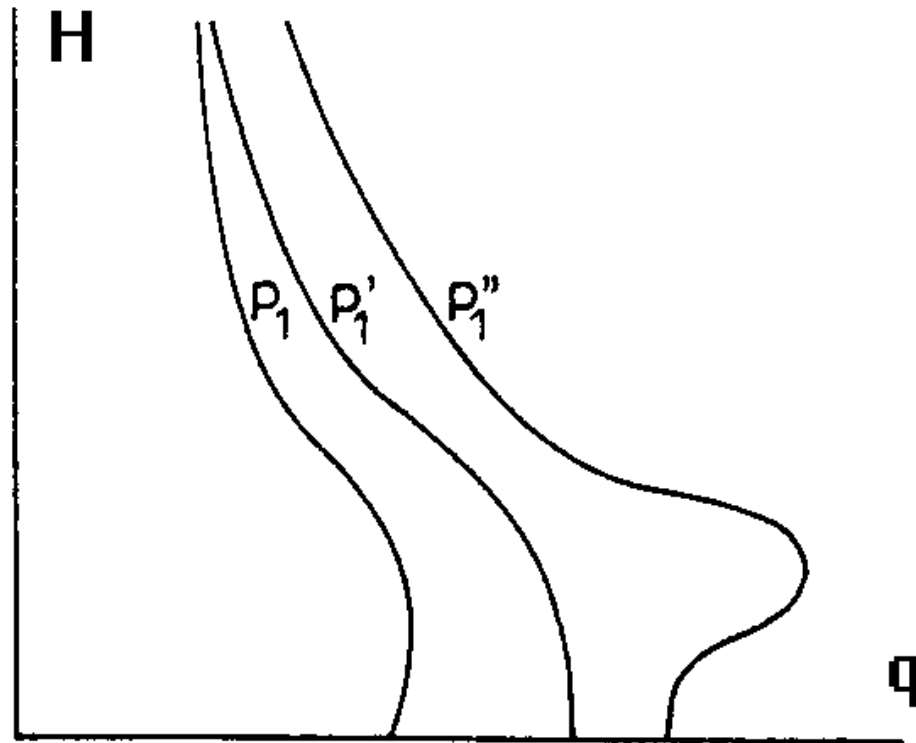
$$16 \text{ g / mol} + 64 \text{ g / mol} = 44 \text{ g / mol} + 36 \text{ g / mol}$$

$$1 \text{ kg} + 4 \text{ kg} = 2,75 \text{ kg} (55\%) + 2,25 \text{ kg} = 5 \text{ kg} + H_{\ddot{u}} (47 \text{ MJ / kg})$$

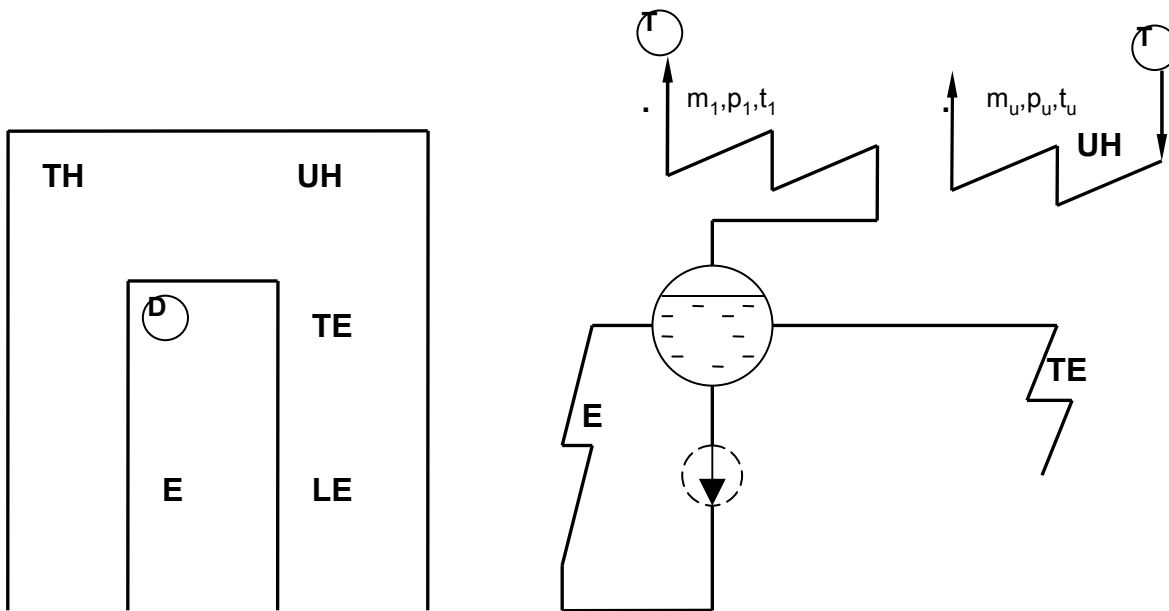
Gőzkazán



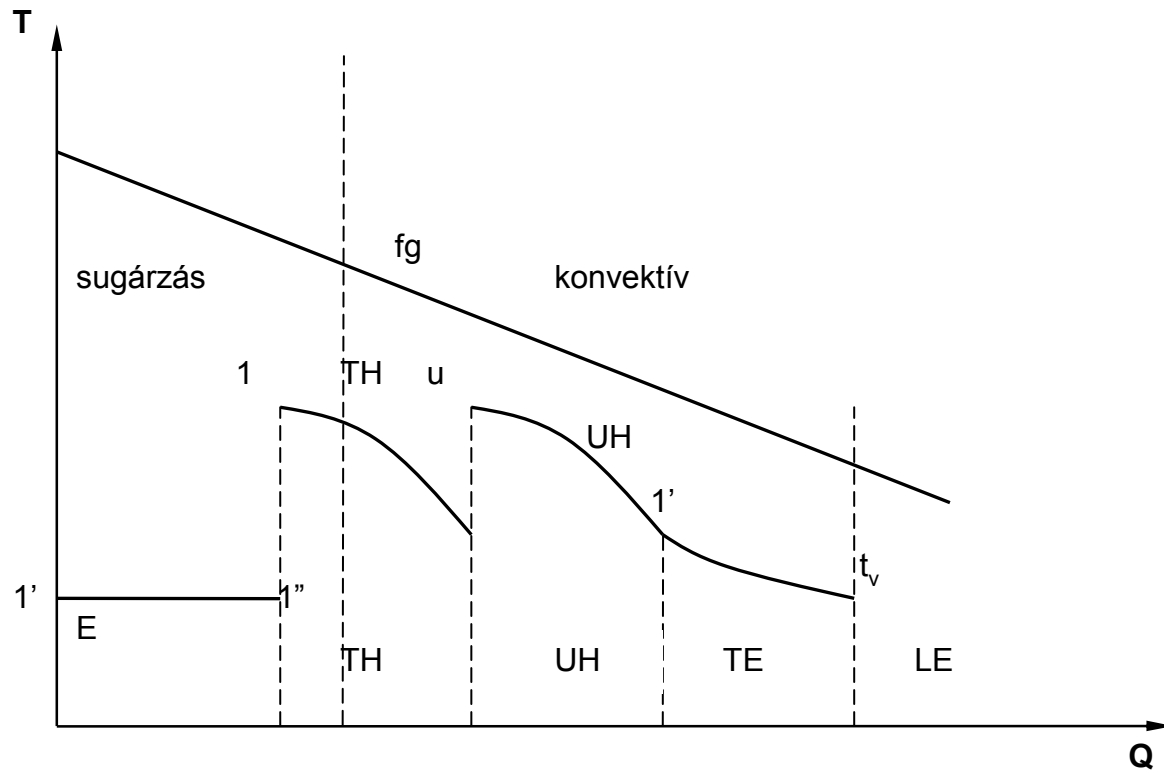
A hőáram-sűrűség változása a tüztér magassága mentén ($p_1 < p_1' < p_1''$)



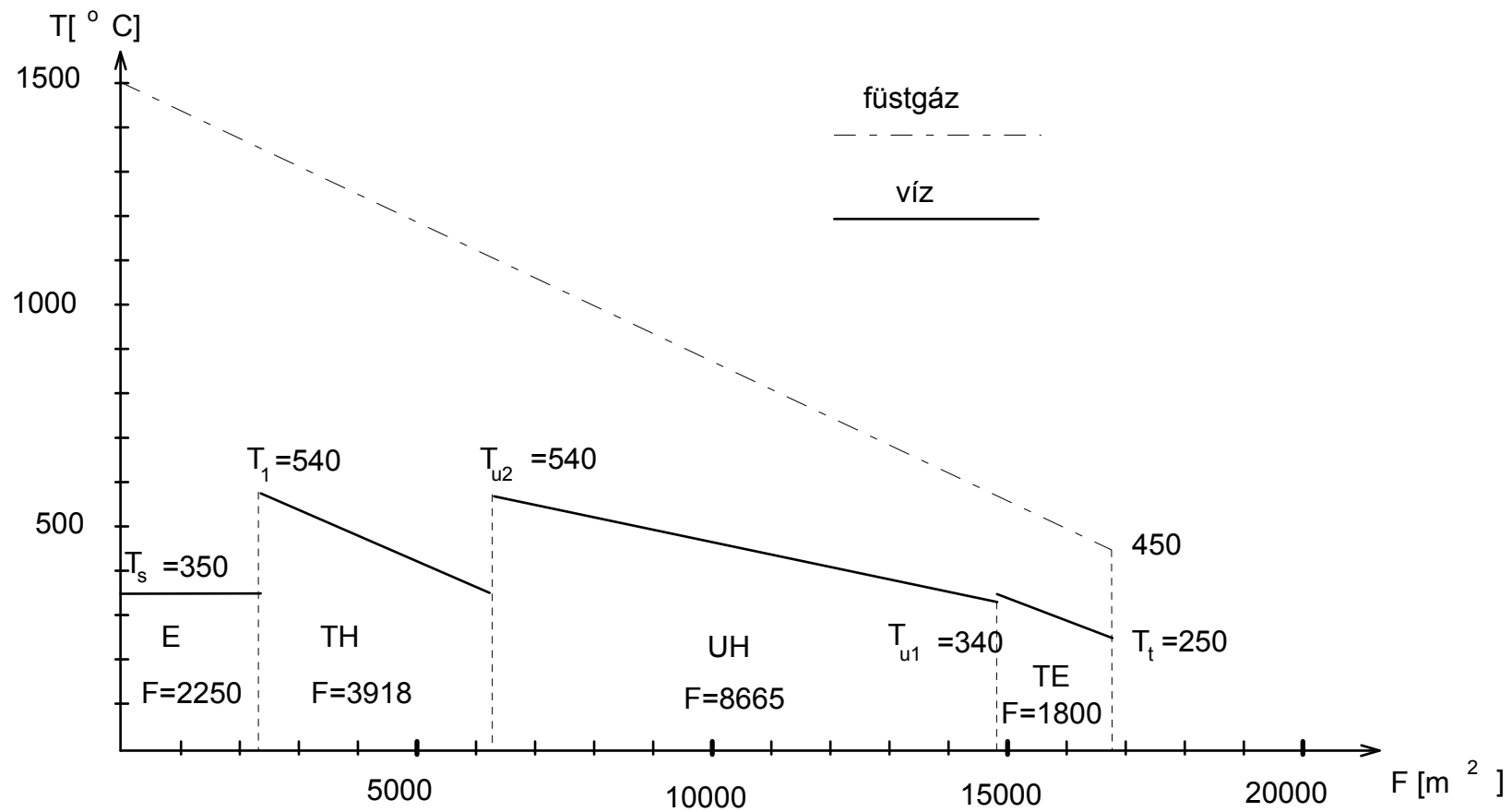
Szubkritikus gőzkazán: a felületek elrendezése



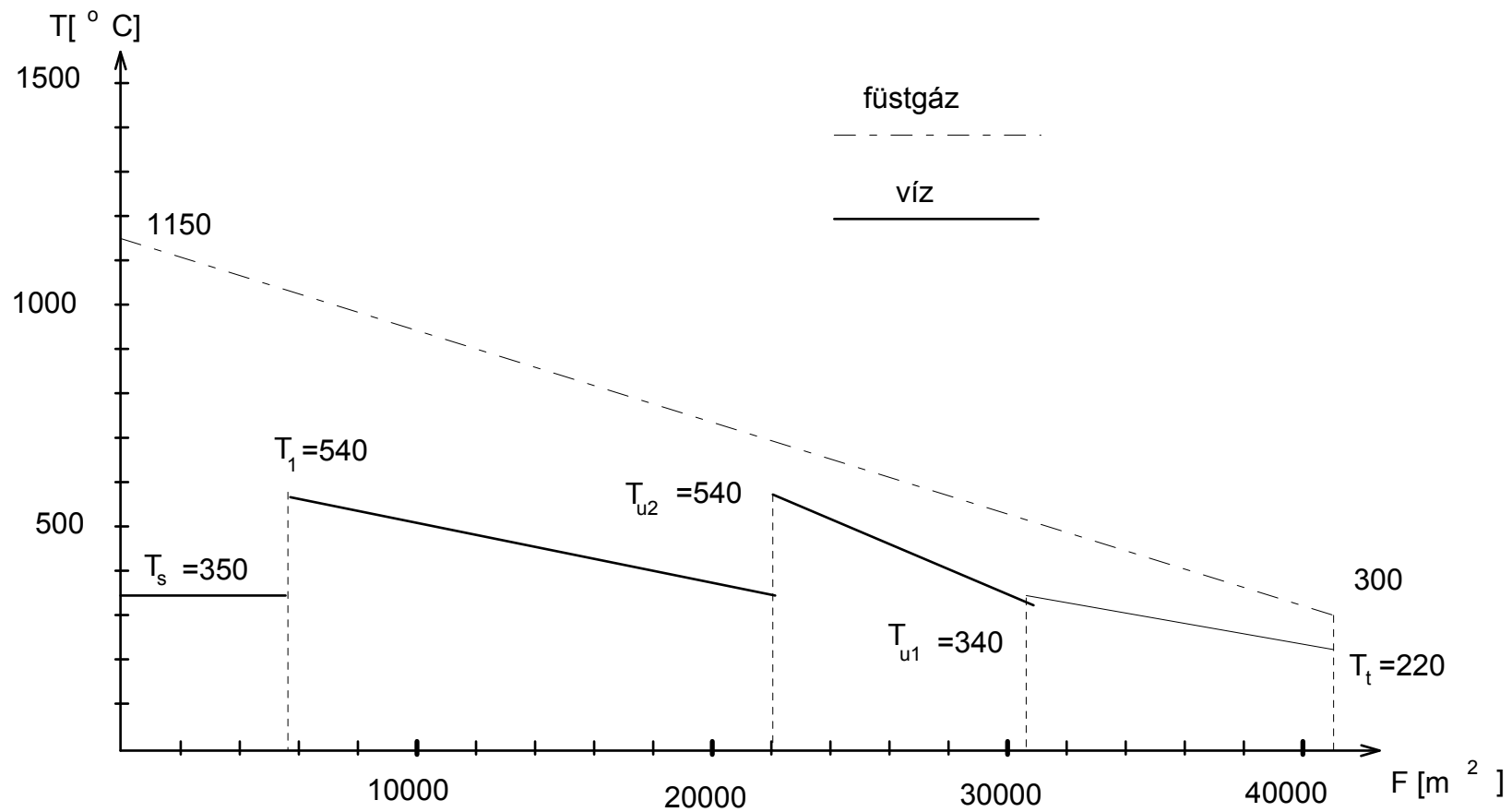
Gőzkazán: T-Q diagram



670 MW névleges hőteljesítményű szénhidrogén-tüzelésű kazán T-F diagramja (dunamenti és tiszai 215 MW-os blokkok kazánja)



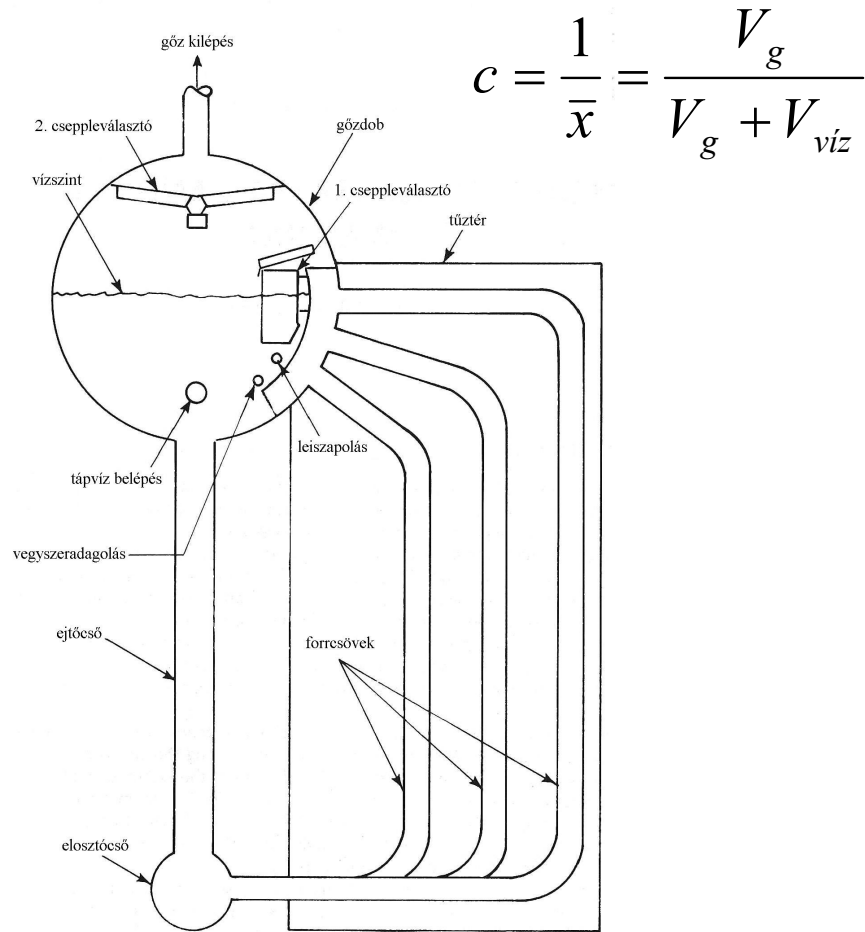
670 MW névleges hőteljesítményű, lignit-tüzelésű kazán T-F diagramja (mátrai 215 MW-os blokk kazánja)



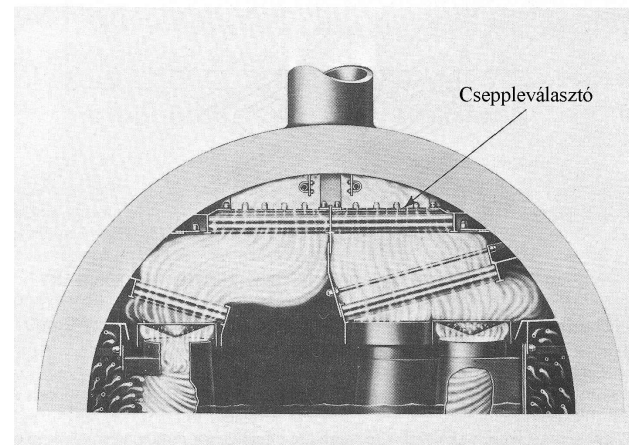
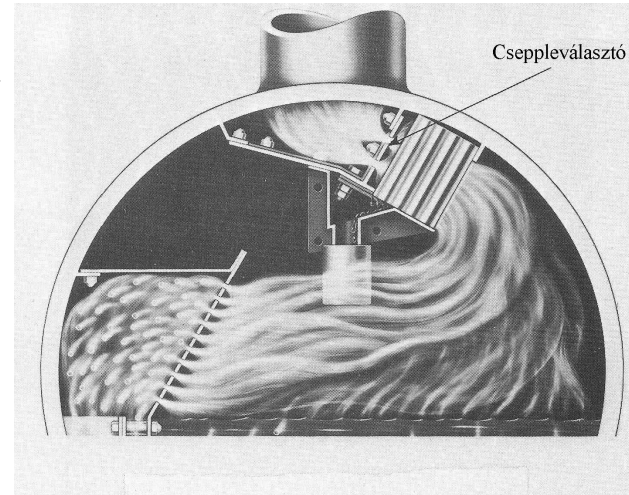
Gőzkazán

- **Gőznyomás szerint:**
 - szubkritikus ($p_1 < p_{kr} = 221,2$ bar)
 - 40,70,100,130,170 bar (130 bar-tól újrahevítés),
 - t_{1max} : 540-560 °C.
- **Munkaközeg cirkulációja szerint:**
 - természetes cirkuláció ($\Delta p = \Delta H_g$, $c=4-10$),
 - szivattyús cirkuláció ($\Delta p = \Delta p_{sz}$, $c=2-6$),
 - kényszerátáramlású ($c=1$).
- **Gőznyomás szerint:**
 - szuperkritikus ($p_1 > p_{kr}$)
 - 240,280,320 bar (280 bar-tól kétszeres újrahevítés),
 - t_{1max} : 600-650 °C (új szerkezeti anyagok).
- **Munkaközeg cirkulációja szerint:**
 - kényszerátáramlású.

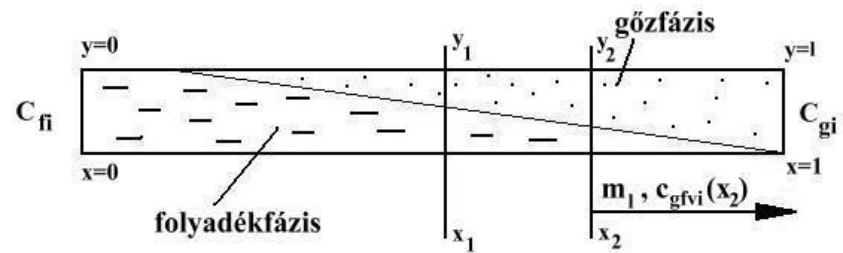
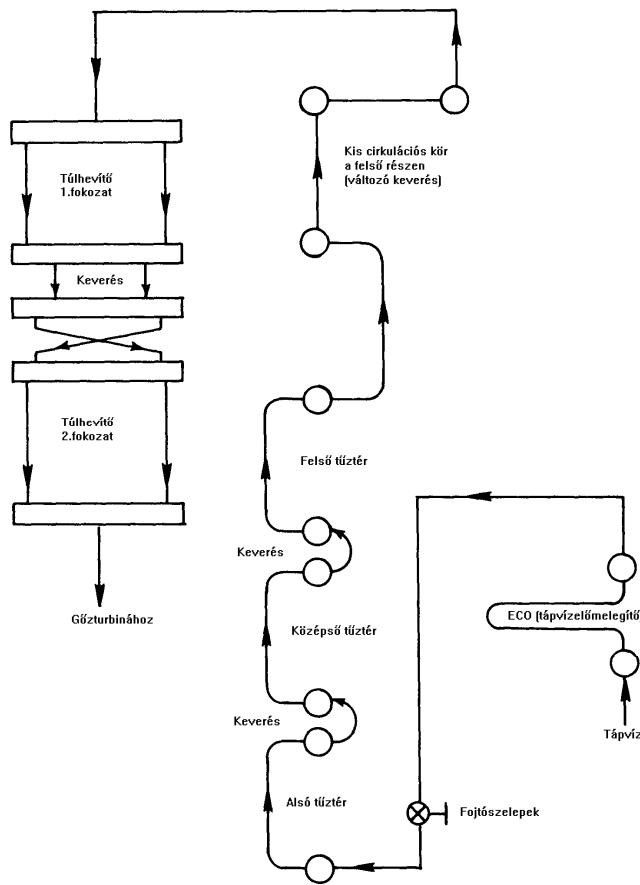
Cirkulációs elgőzölögtető [Cohen]



$$c = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{V_g}{V_g + V_{v\acute{z}}}$$



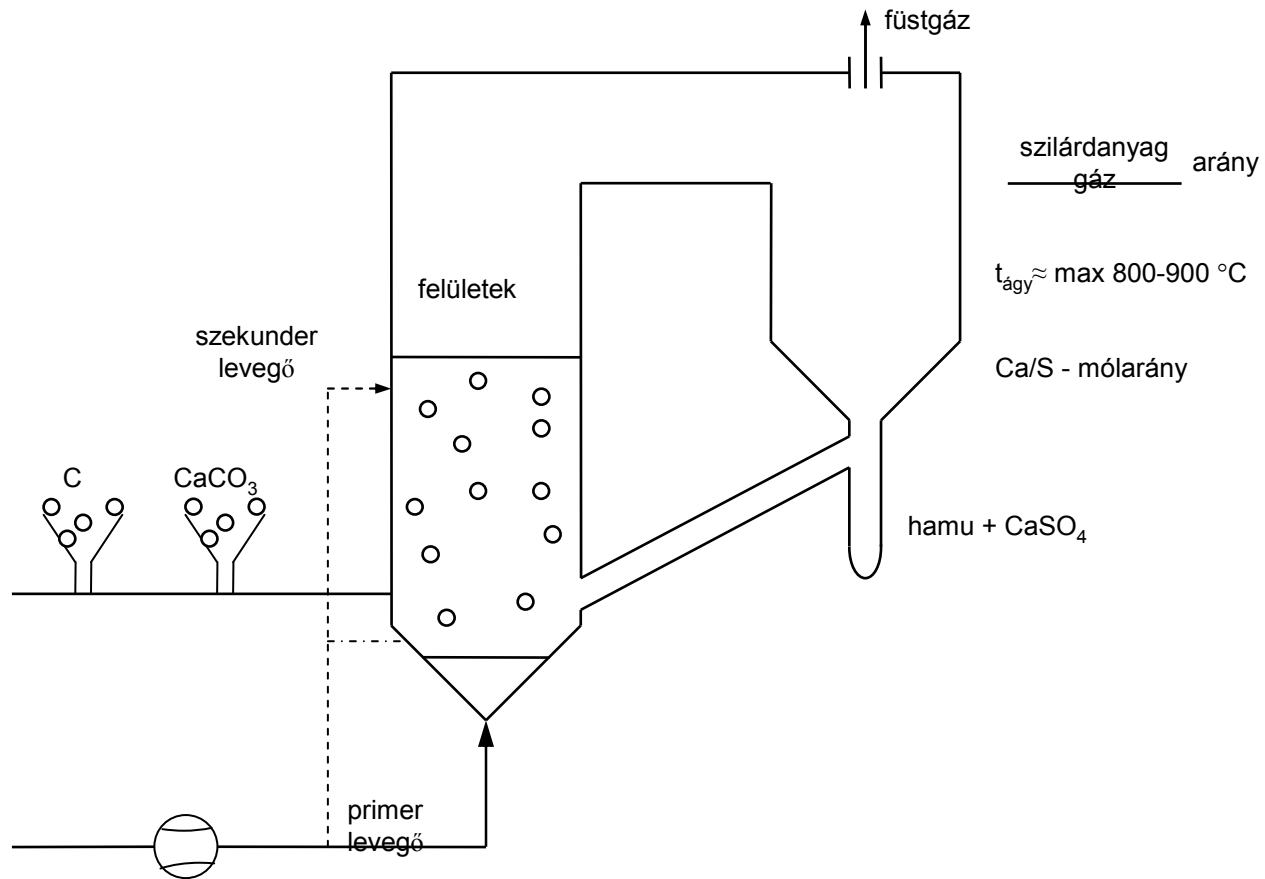
Kényszerátáramlású gőzkazán [Cohen]



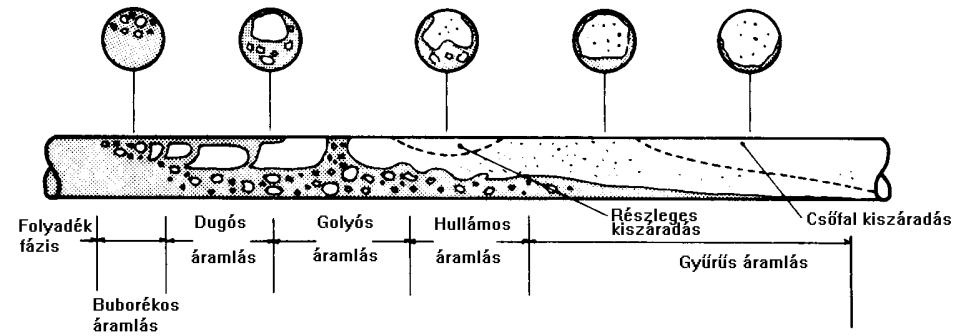
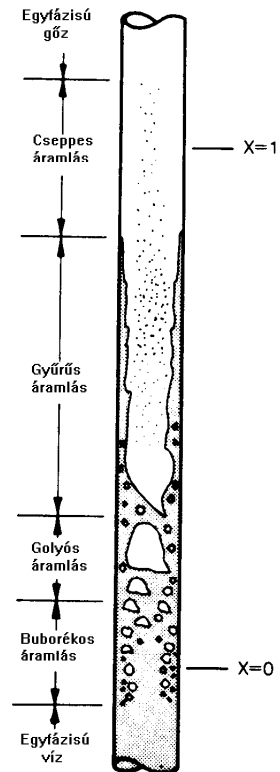
$$x(y)c_{gi}(y) + [1-x(y)] \cdot c_{gfvi}(y)$$

$$[1-x(y)] \cdot (m_t - m_l) \cdot c_{gfvi}(y)$$

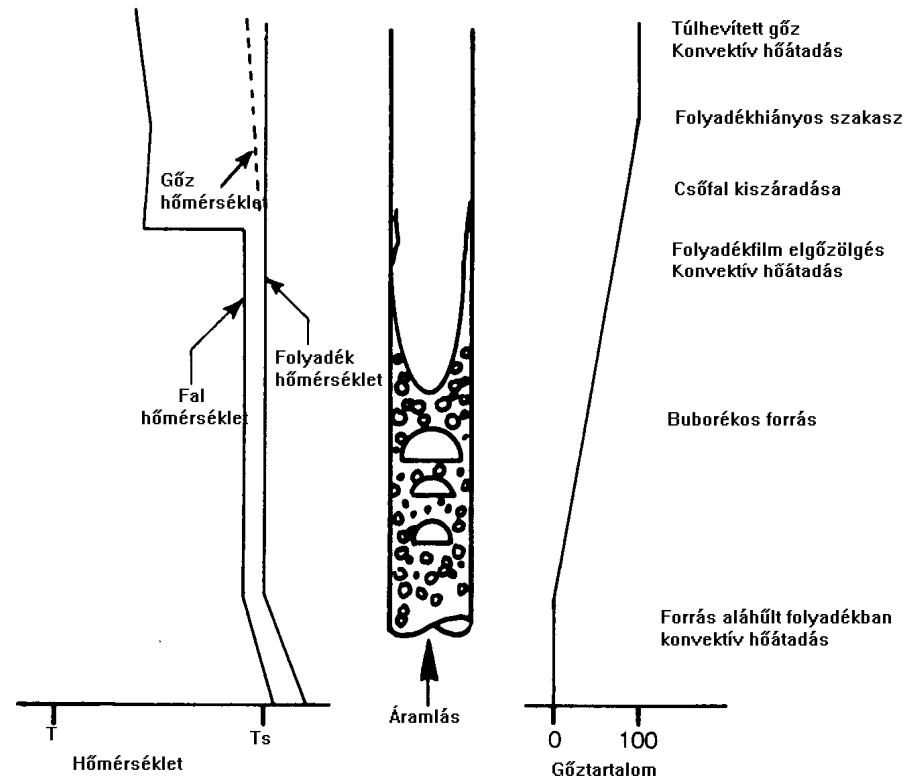
Fluid-tüzelésű gőzkazán



Forráskép függőleges és vízszintes csőben



A víz elgőzölgése függőleges csőben: hőmérséklet és hőátadási viszonyok [Cohen]



Gőzkazán

- **Teljesítménymérleg:**

$$\dot{Q}_{\ddot{u}} = \dot{m}_{\ddot{u}} H_{\ddot{u}}$$

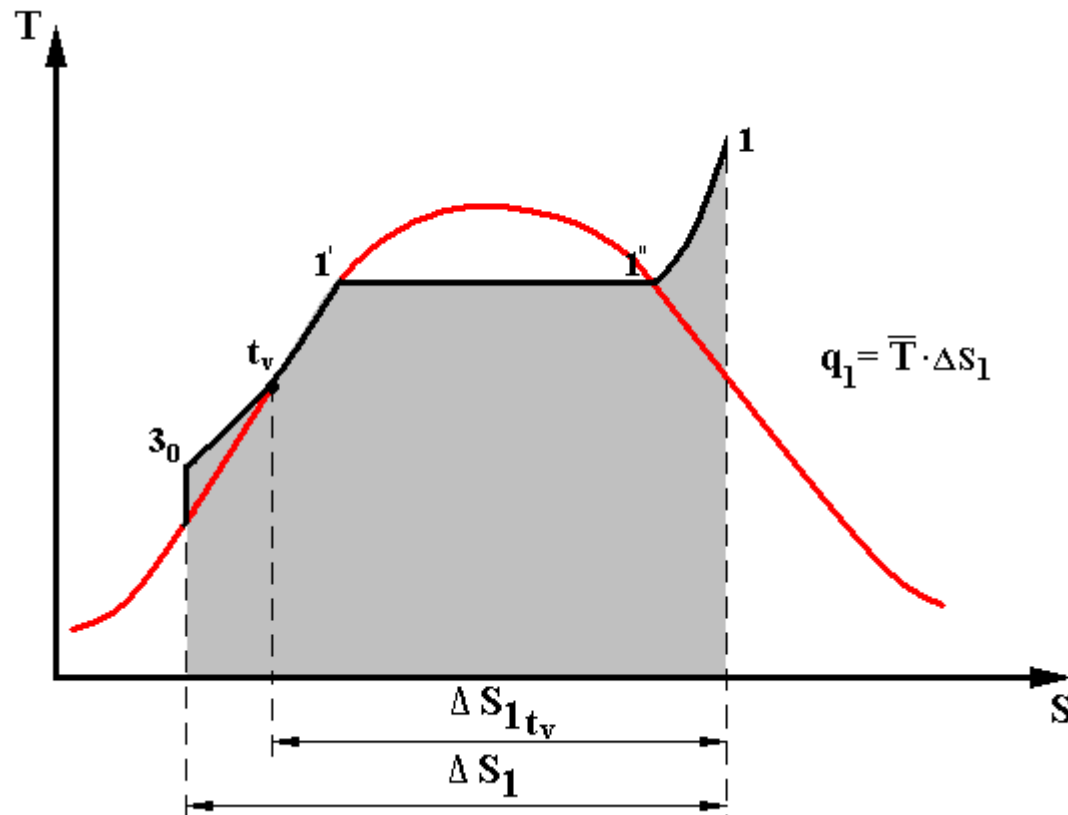
$$\dot{Q}_1 = \eta_{GK} \dot{Q}_{\ddot{u}} = \dot{m}_g \bar{T}_1 (s_1 - s_{tv}) = \dot{m}_g (h_1 - h_{tv})$$

- **Hatásfok:**

$$\eta_{GK} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_{\ddot{u}}}$$

- **C (6-28 MJ/kg): 0,82-0,92**
- **kőolaj: 0,85-0,92**
- **földgáz: 0,87-0,94.**

Fajlagos gőzhő



Gőzkazán (Tisza II. 670 t/h)

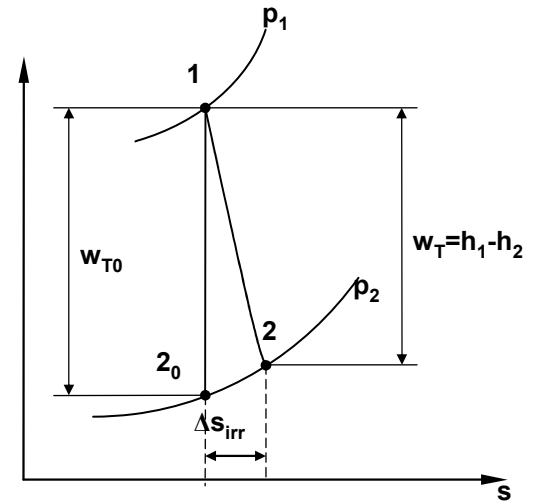
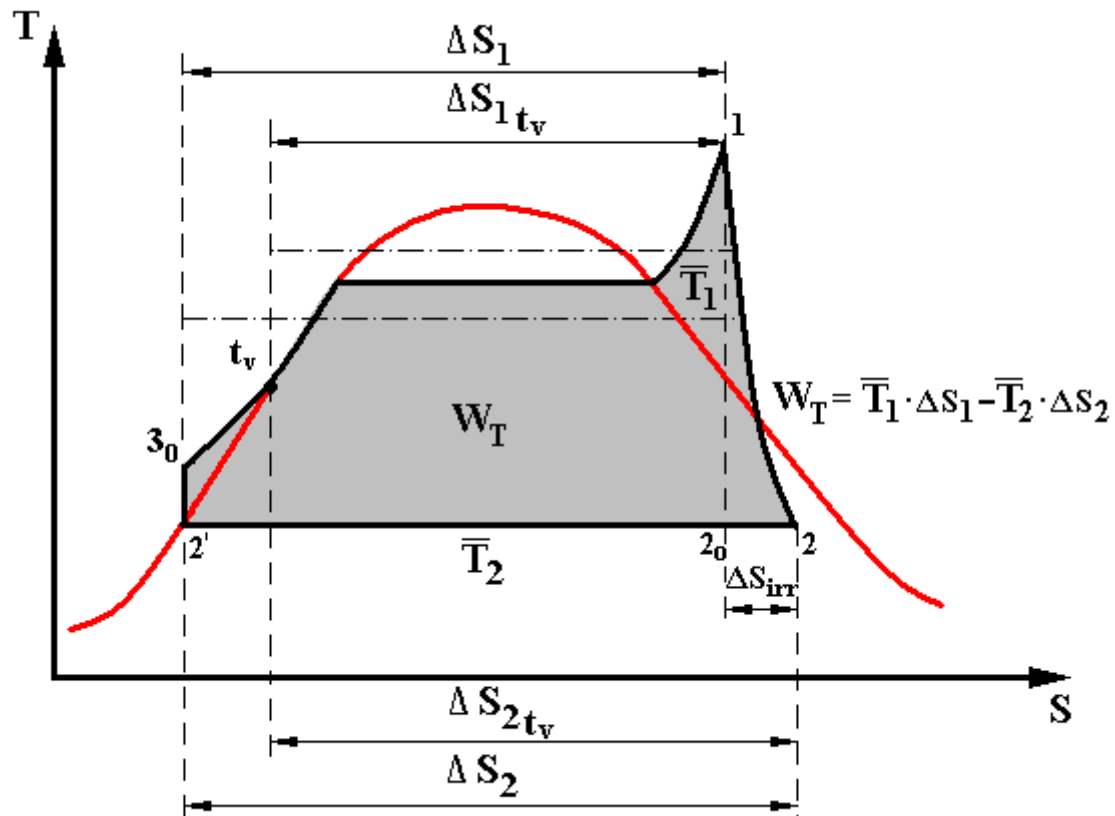


1.2. Gőzturbina

- ***Gőzturbina (GT, 1-2o, 1-2): A nagy nyomású, hőmérsékletű vízgőz (belső) termikus energiájának forgási (mechanikai) energiává alakítása a turbinalapát-fokozatokban.***
Fordulatszám: n=3000 1/perc (50 Hz), n=3600 1/perc (60Hz).
- **Tengelyteljesítmény:**

$$\dot{W}_T = \eta_C \dot{Q}_1 \eta_{irrT} = \dot{m}_g (h_1 - h_{2o}) \eta_{irrT}$$

Fajlagos (technikai) munka



Gőzturbina

- **A körfolyamat termodinamikailag meghatározott (Carnot) hatásfoka:**

$$\eta_c = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}$$

- $\eta_c = 0,35 - 0,60 \rightarrow f[\bar{T}_1(p_1, t_1, t_{tv}, t_{UH1}, t_{UH2}),$
- $\bar{T}_2(p_2)]$
- $\eta_{irrT} > \eta_{irr} \rightarrow$ (hővisszanyerés)

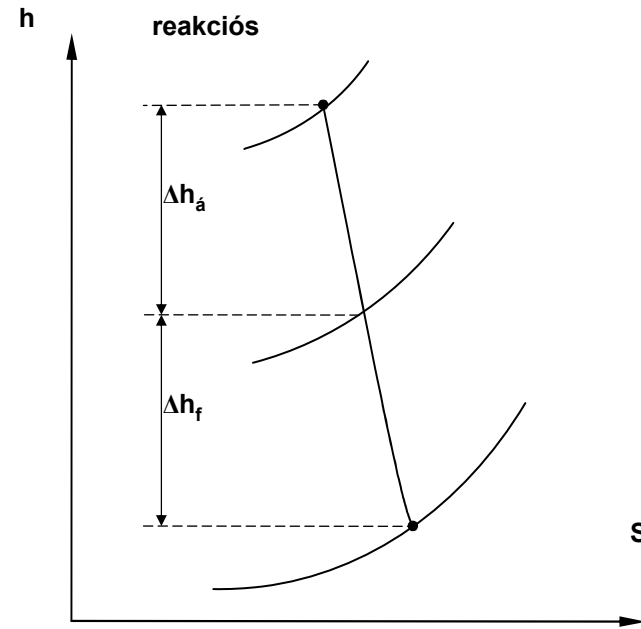
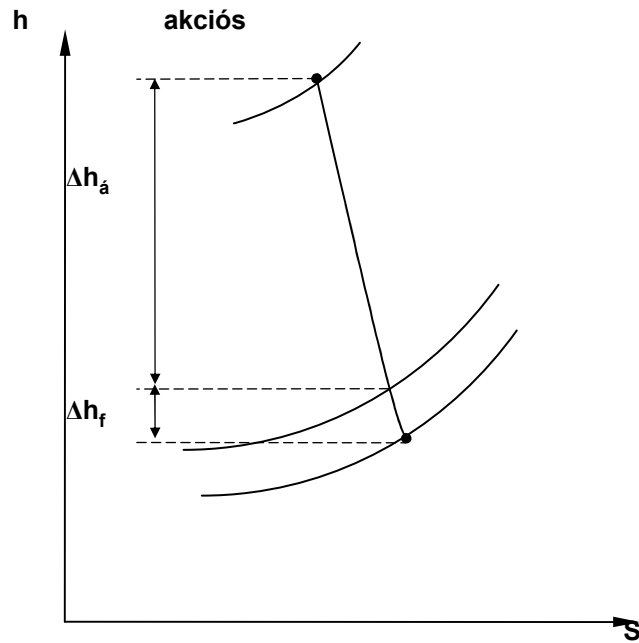
Gőzturbina

- **A körfolyamat hatásfokának (η_c) növelése:**
 - a gőz kezdő nyomásának (p_1) és hőmérsékletének (t_1) növelése,
 - megcsapolásos (regeneratív) tápvízfelmelegítés (t_{tv} növelése),
 - egyszeres (t_{UH1}) és kétszeres (t_{UH1}, t_{UH2}) újrahevítés,
 - a gőz végnyomásának (p_2) csökkentése ($p_2 \approx 0,03$ bar) elérte a határt.
- **Megcsapolásos tápvízfelmelegítés:** a kondenzálódott folyadékfázisú 25-50 °C-os víz felmelegítése a kazánba lépő tápvíz minél nagyobb hőmérséklete (t_{tv}) érdekében.
- **(Gőz) újrahevítés:** a turbinában expandált gőz kivétele és felmelegítése a gőzkazánban p_{UH} nyomáson.

Gőzturbina-lapátok

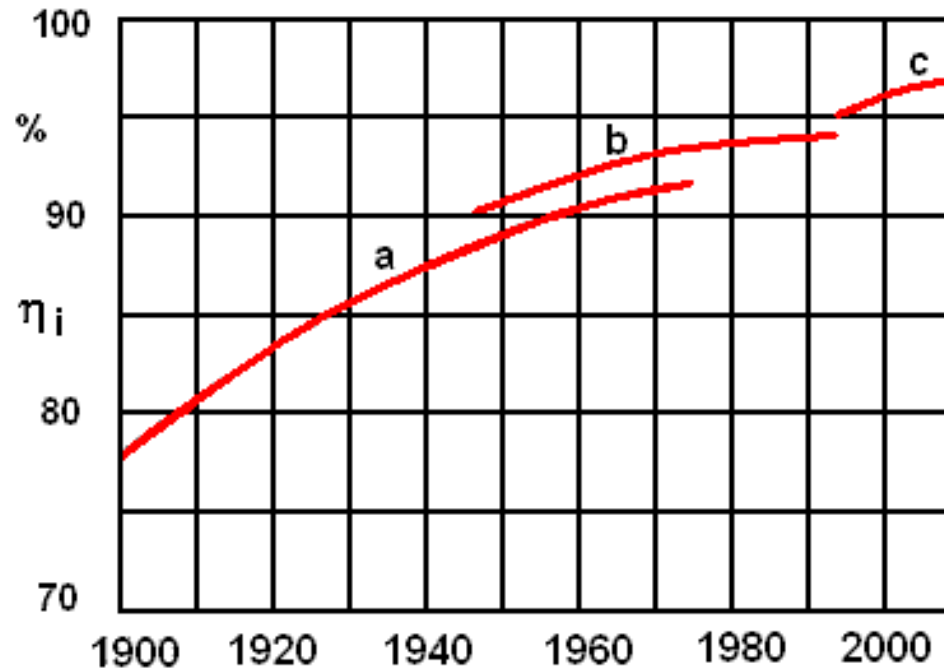
- **A GT eredő hatásfokát**
 - a lapátok fokozati hatásfoka és
 - az expanzió mértéke határozza meg.
 - **A GT-fokozat hatásfokát befolyásolja a lapátfelület érdessége ($<0,3-0,2 \mu\text{m}$).**
 - **Lapátfokozat**
 - akciós (résvesztesség csökkenthető) termikus-kinetikus energia átalakítás (állólapát-sor),
 - reakciós (sebességtől függő súrlódási veszteségek csökkenthetők) kinetikus-mechanikai energia átalakítás (forgólapát-sor),
 - Fokozat: álló+forgólapát-sor.
- Eltérő követelmények a nagy- és kisnyomású fokozatokban.**

Gőzturbina-lapátfokozatok



Gőzturbina-lapátok fejlesztése [Büki]

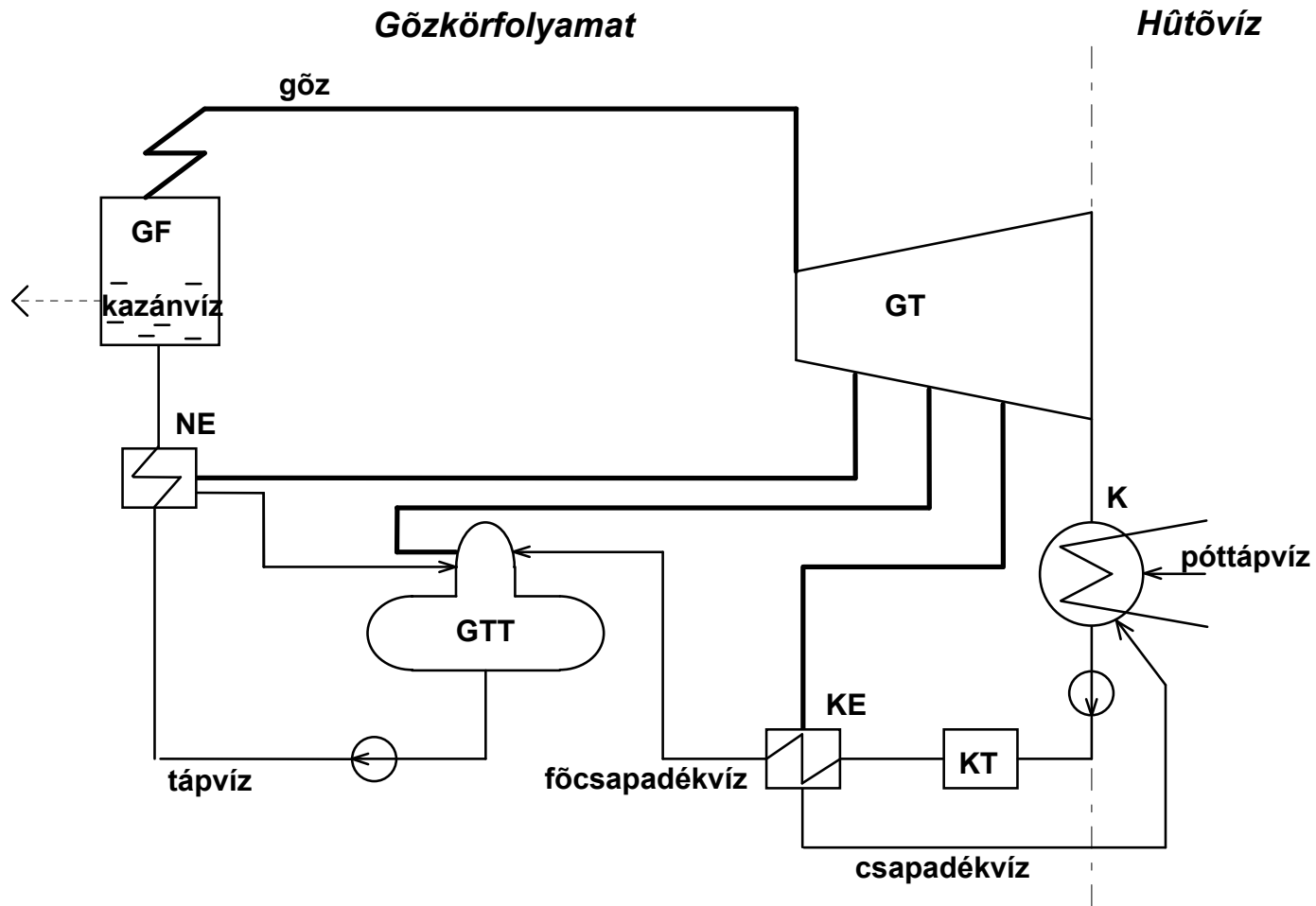
a-zárólemez nélkül, b-zárólemezzel, c-nagyteljesítményű lapátok



Gőzturbina lapátjainak fejlesztése

a) zárólemez nélkül b) zárólemezzel c) nagyteljesítményű lapátok

Hősema: fő elemek



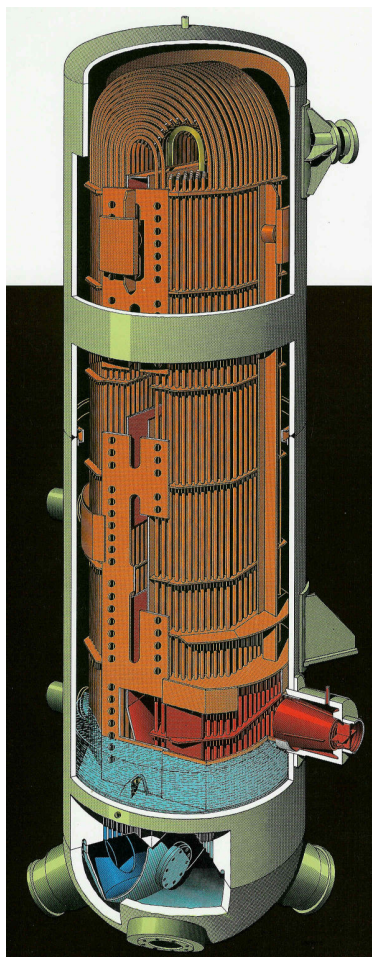
Gőzturbina (Tisza II. 215 MW_e)



Gőzturbina nagynyomású forgórész (Tisza II.)



Tápvízelőmelegítő



1.3. Generátor és transzformátor

- **Generátor, transzformátor:** A gőzturbina forgási energiájának 10-40 kV feszültségű villamos energiává alakítása (G), és transzformálása (TR) a szállítás nagyfeszültségére (120-400 kV).

$$P_{KE} = \eta_{Tm} \eta_G \eta_{TR} \eta_\varepsilon \dot{W}_T = \eta_{mE} \dot{W}_T$$

- **Hatásfokok:**
 - $\eta_{Tm} = 0,99-0,995,$
 - $\eta_G = 0,99-0,995,$
 - $\eta_{TR} = 0,99-0,998,$
 - $\eta_\varepsilon = 0,92-0,96,$
 - $\eta_{mE} = 0,89-0,95.$

Generátor (Mátrai 215 MW_e)



Transzformátor



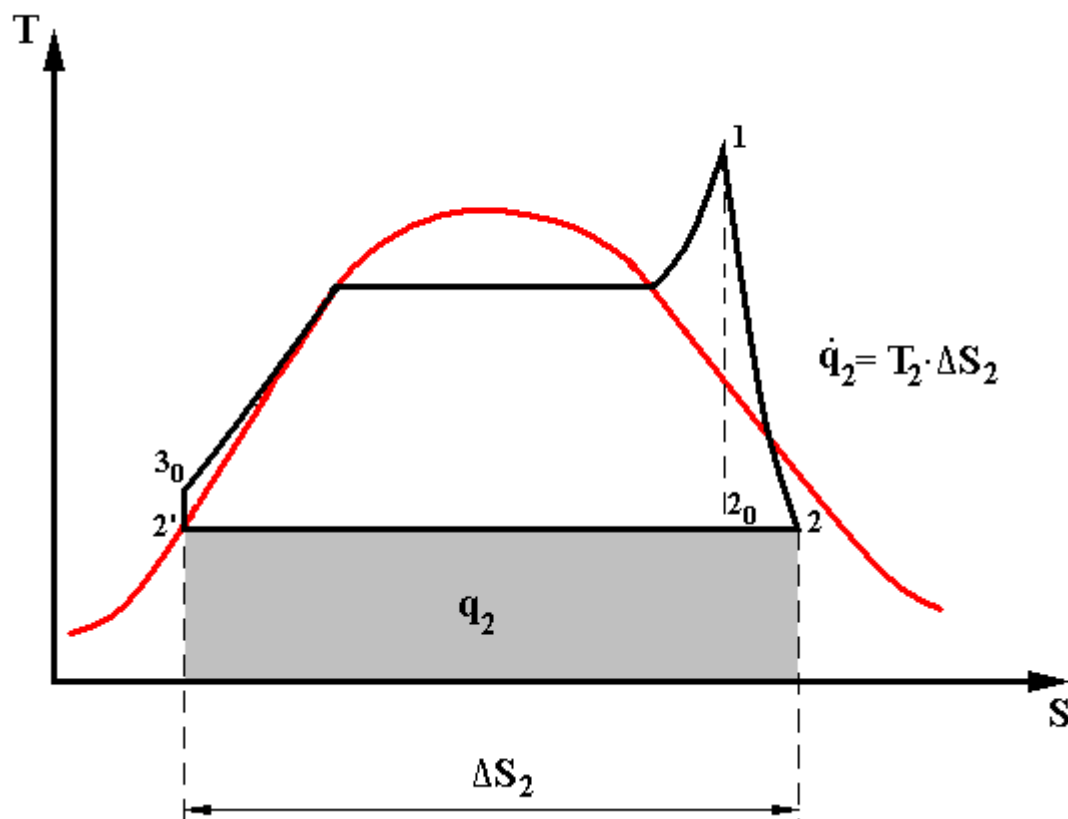
1.4. Kondenzátor

- **Kondenzátor (K, 2-2')**: A gőzturbinában munkát végzett, további munkavégzésre alkalmatlan vízgőz cseppfolyósítása (kondenzálása), s kondenzációs hő elvonása a környezetbe a hűtővíz-rendszerrel.
- **Környezetbe távozó hőteljesítmény:**

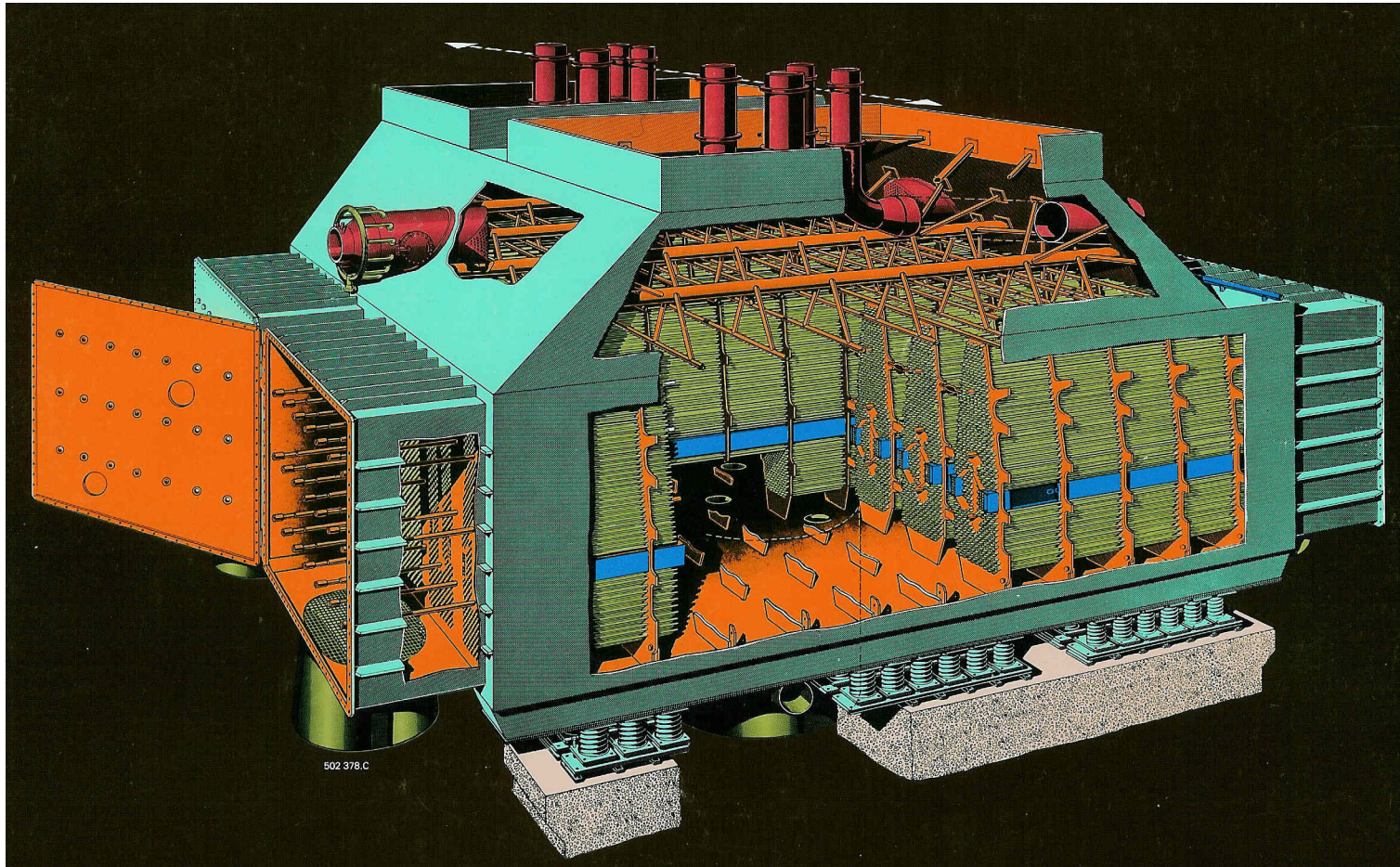
$$\dot{Q}_2 = \left(\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} + (1 - \eta_{irrT}) \right) \dot{Q}_1 = \dot{m}_2 (h_2 - h_{2'})$$

- **Hűtővíz-rendszerek:**
 - frissvízhűtés (folyó, tó, tenger),
 - nedves hűtőtorony,
 - száraz hűtőtorony.

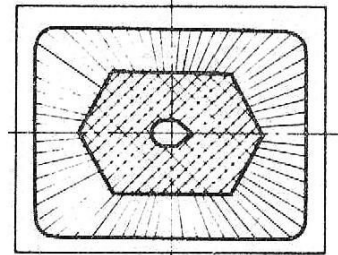
Fajlagos elvont hő



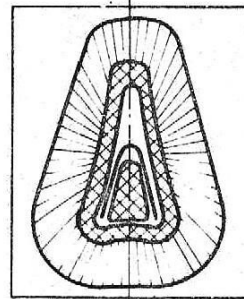
Kondenzátor



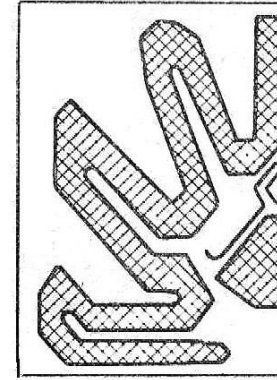
Csőkiosztás



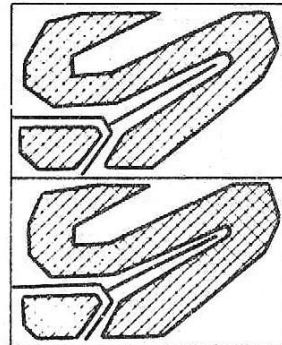
a)



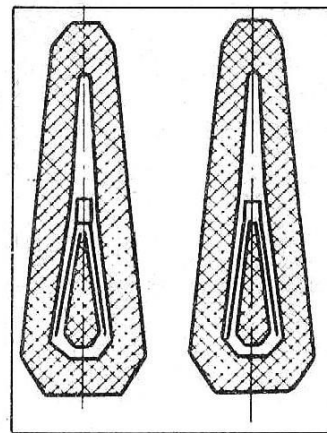
b)



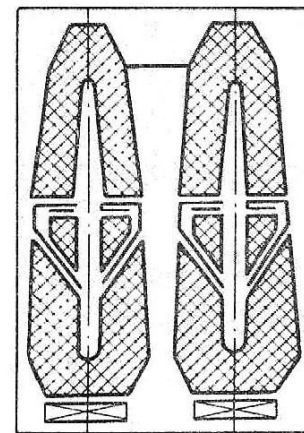
c)



d)

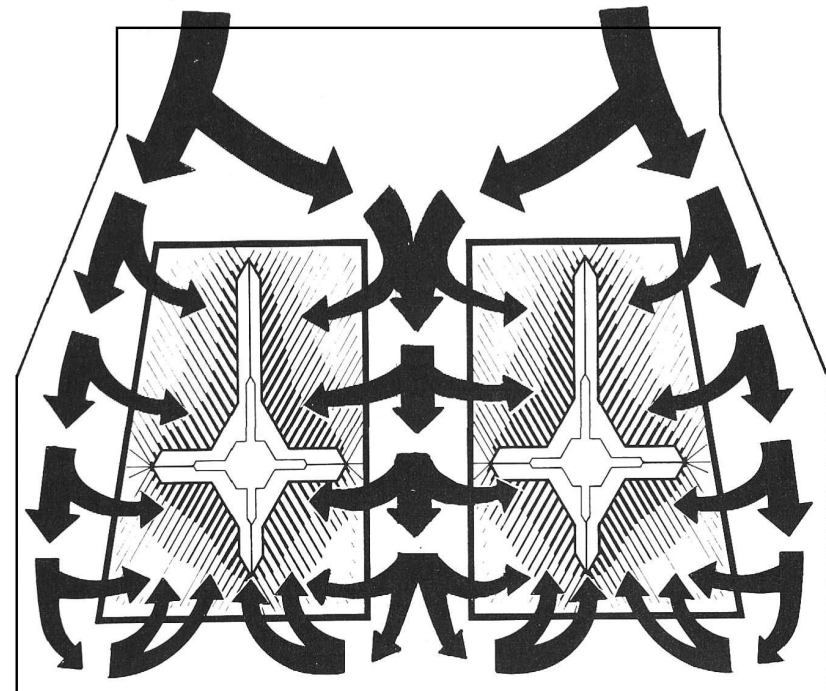
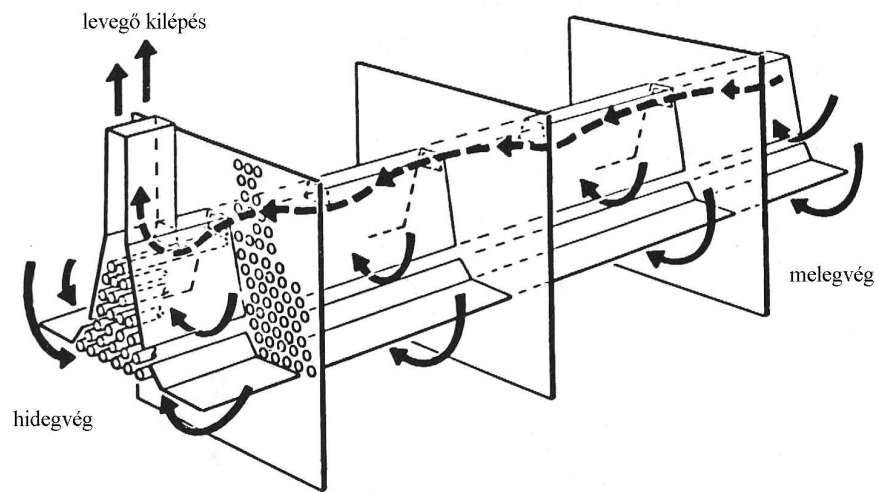


e)

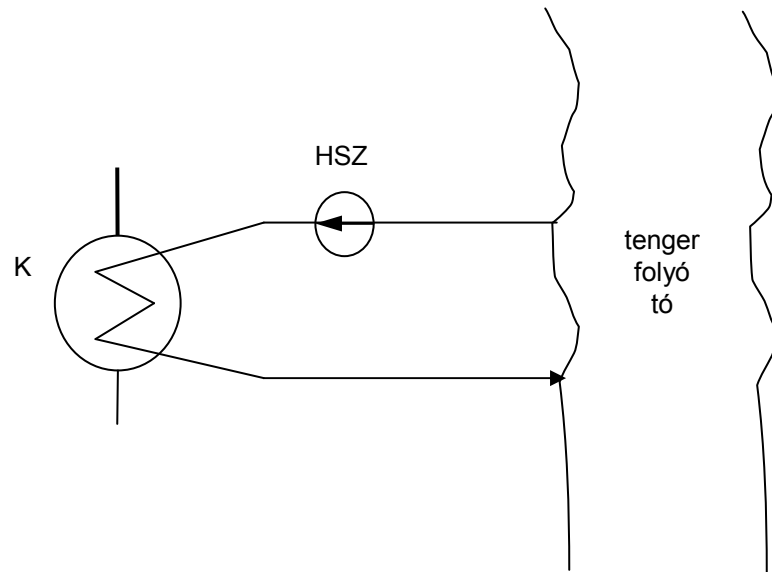


f)

Gőz és gőz-levegő keverék áramlás a köpenytérben [Cohen]

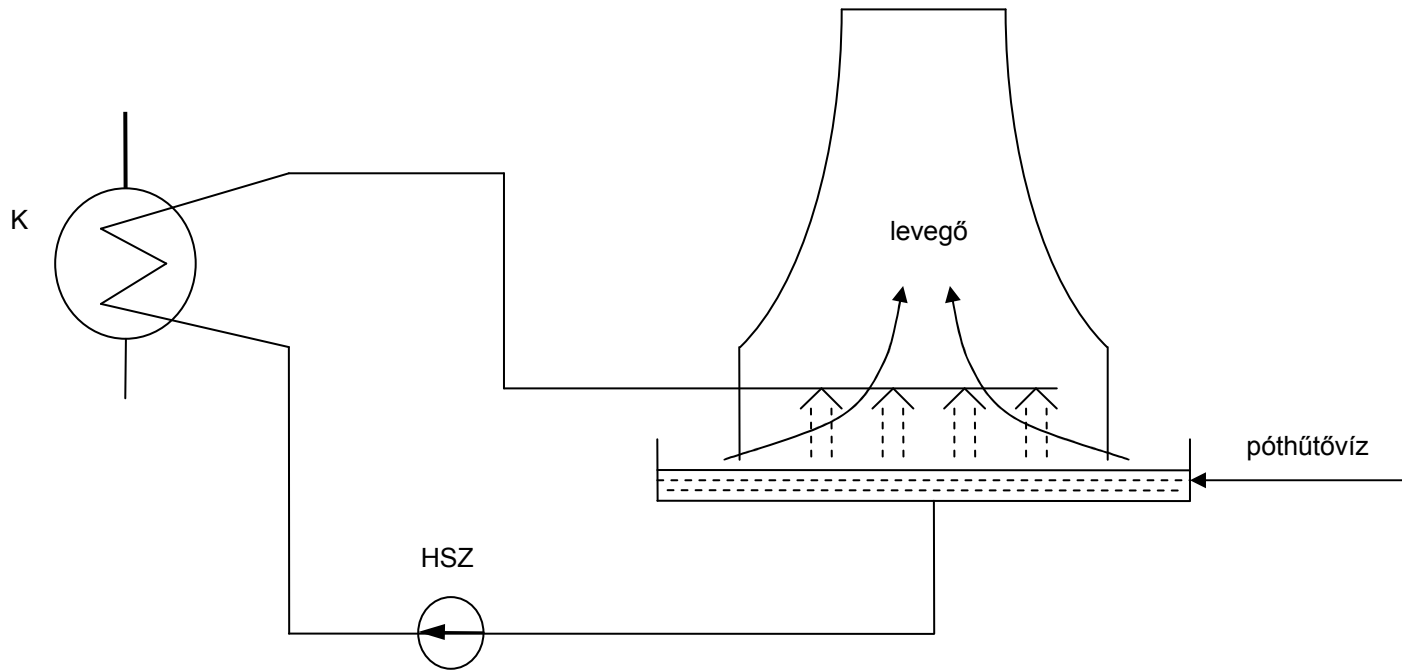


Frissvízhűtés



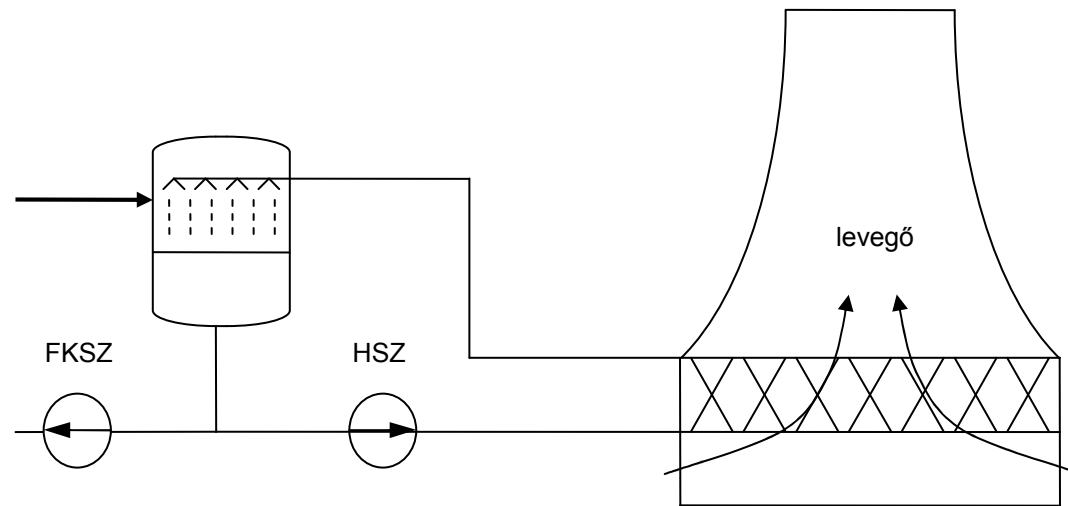
$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{gK} (h_2 - h_{2'}) = \dot{m}_{hv} c (t_{ki} - t_{be})$$

Nedves hűtőtorony



$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{gK} (h_2 - h_{2'}) = \dot{m}_{hv} c (t_{ki} - t_{be}) = \dot{V}_l \rho_l c_l (t_{lki} - t_{lbe})$$

Száraz hűtőtorony



$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{gK} (h_2 - h_{2'}) = \dot{m}_{hv} c (t_{be} - t_{ki}) = \dot{V}_l \rho_l c_l (t_{lki} - t_{lbe})$$

Nedves hűtőtorony (Mátrai Erőmű)



Száraz hűtőtorony (Mátrai Erőmű) kéntelenítővel



2. Energetikai jellemzők

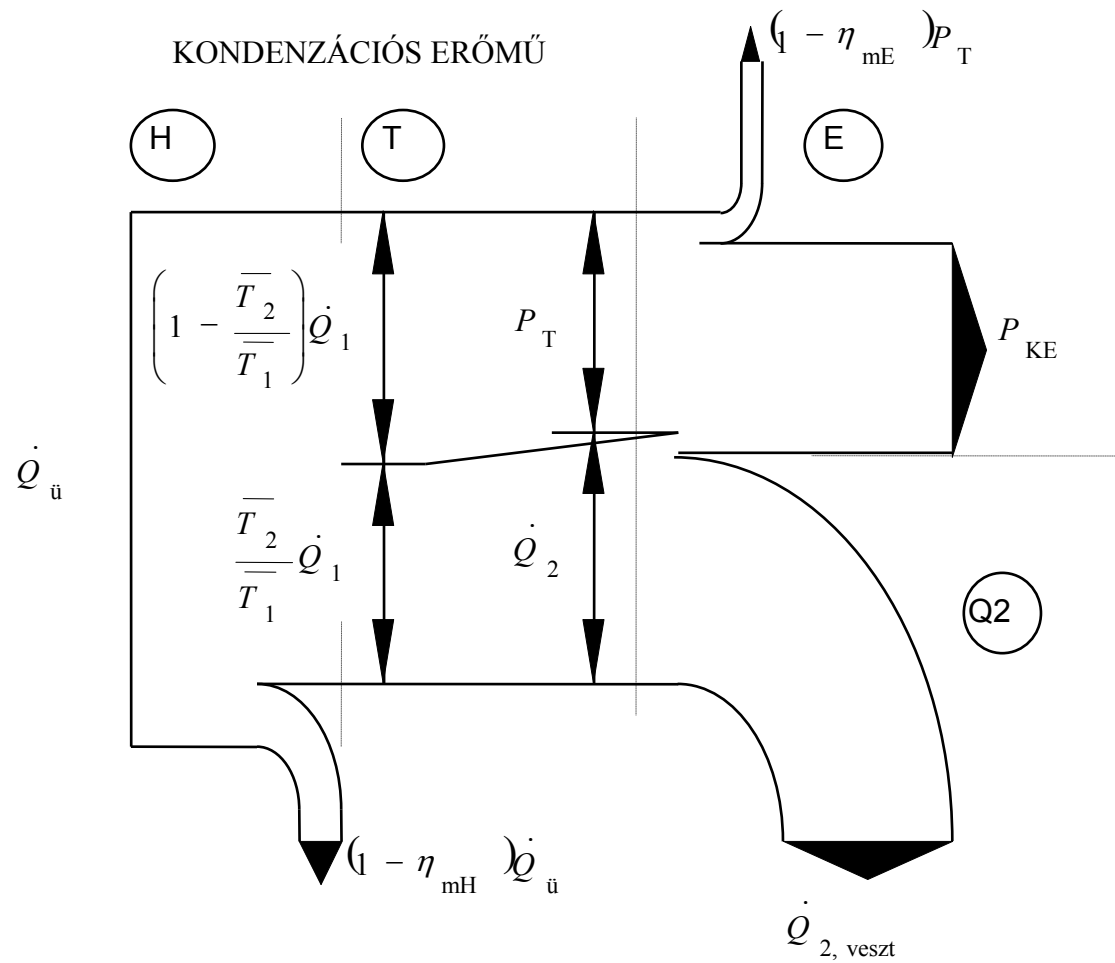
- **Hatásfoka:**

$$\eta_{KE} = \frac{P_{KE}}{\dot{Q}_{\ddot{u}}} = \frac{\eta_{GK} \eta_C \eta_T \eta_{mE} \dot{Q}_{\ddot{u}}}{\dot{Q}_{\ddot{u}}} = \eta_{GK} \eta_C \eta_T \eta_{mE} = (0,20 - 0,46) J_E / J_{\ddot{u}}$$

- **Fajlagos tüzelőhő-felhasználása:**

$$q_{KE} = \frac{1}{\eta_{KE}} 3600 = (18000 - 7830) kJ_{\ddot{u}} / kWh_E$$

Energiafolyam ábra



3. Környezeti hatások

- **CO₂ kibocsátás** → η_{KE} növelése, mert gCO₂/kWh csökken.
- **Hőszennyezés:** $(0,75-0,45)Q_{\ddot{u}}$ környezetbe távozik, $t_{\text{élővíz}}$ max. 26-30 °C (O₂ tartalom) → **kapcsolt energiatermelés**
- **szén:**
 - SO_x: füstgáz kéntelenítés,
 - pernye: pernyeleválasztás,
 - salak: meddőhányók (minél kisebb H_ü, annál több meddő) → tájrekultiváció.
 - NO_x: DeNOx (NH₃), fluid-tüzelés (SO_x) és kisebb $t_{\text{láng}}$.
- **gudron, pakura:**
 - SO_x: füstgáz kéntelenítés,
 - NO_x: DeNOx (NH₃).

4. Telephely kiválasztás

- **Tüzelőanyag közelében (bánya, olajfinomító), jó megközelítés.**
- **Hűtővíz.**
- **Szakember, szakmakultúra.**
- **Villamos csatlakozás, ellátottság.**
- **Lakott területen kívül.**
- ***Meglévő erőművek telephelyének felértékelődése, mindezek megvannak.***

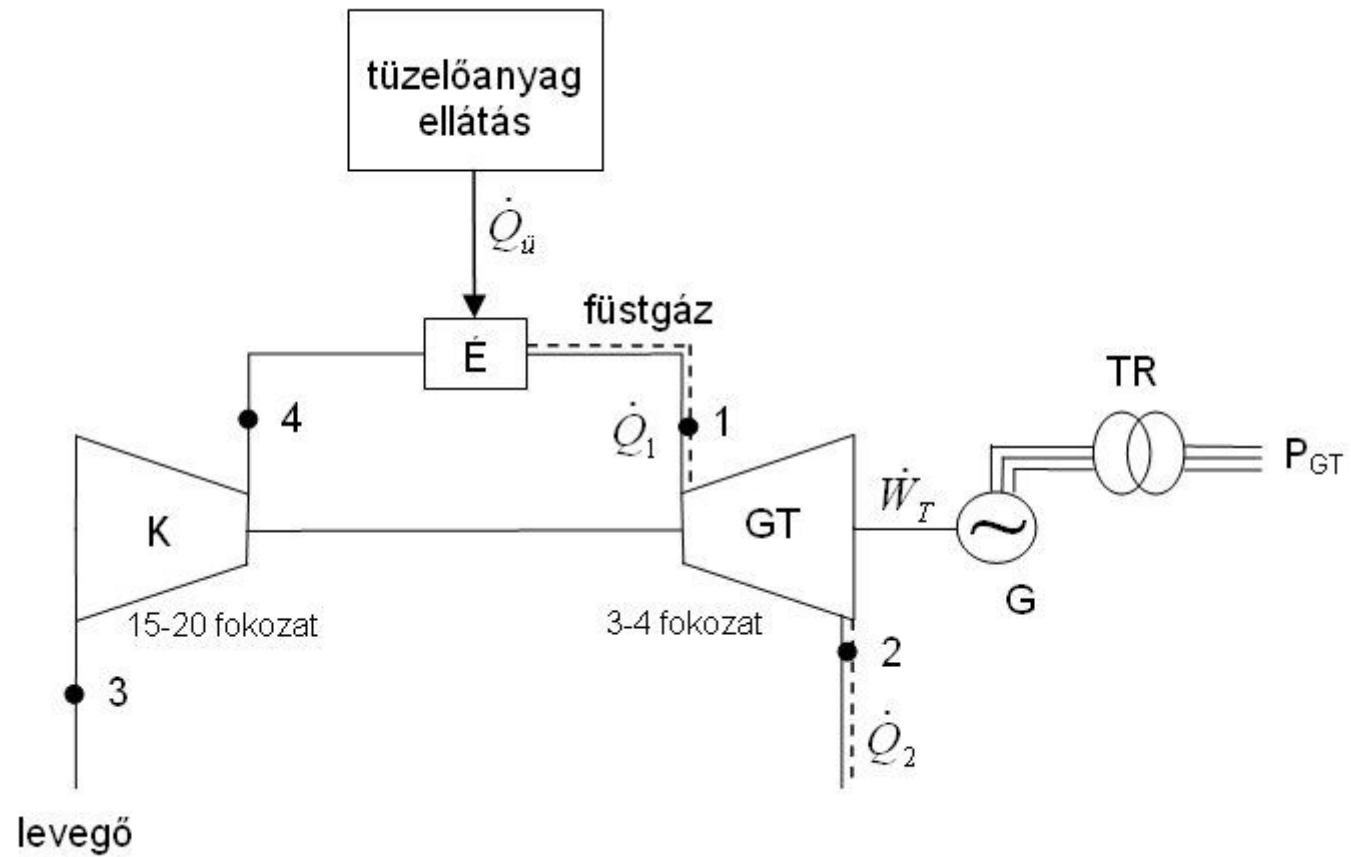
6.2.

Gázturbinás erőművek

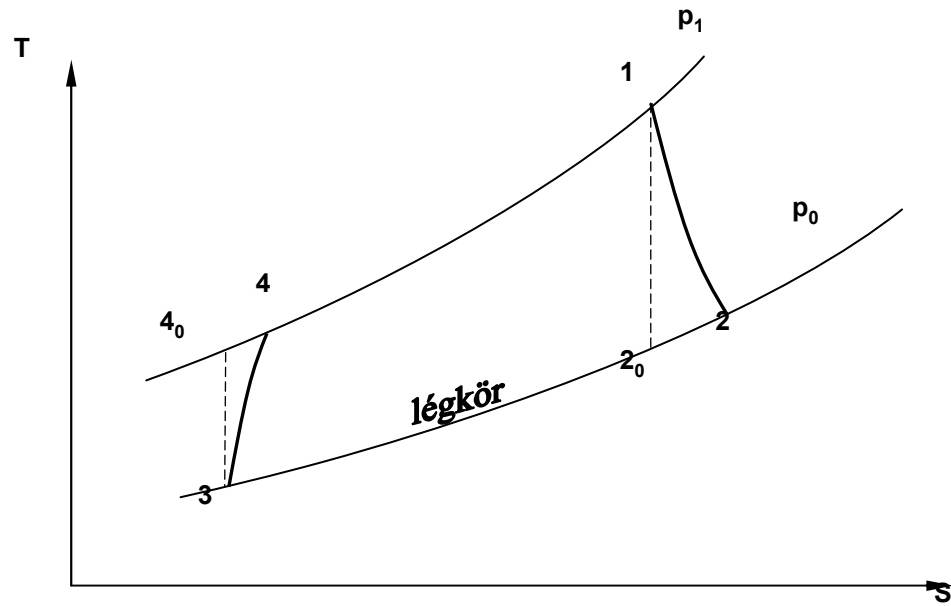
Nyitott egytengelyes gázturbina

- **Nyitott egytengelyes gázturbina fő berendezései:**
 - **Kompresszor (K):** a levegő komprimálása a légköri nyomásról 10-12 (15) bar-ra.
 - **Égőtér (É):** a tüzelőanyag elégetése, a levegő-üzemanyag keverék (füstgáz) hőmérsékletének növelése 1000-1300 (1500) °C-ra.
 - **Turbina (T):** A füstgáz termikus energiájának forgási energiává alakítása a lapátfokozatokban.
 - **Generátor (G), Transzformátor (Tr).**
- **Tüzelőanyag: csak CH,**
 - földgáz (inertes gáz),
 - kerozin,
 - fűtőolaj (állandó terhelésen).

Kapcsolás



Hőkörfolyamat



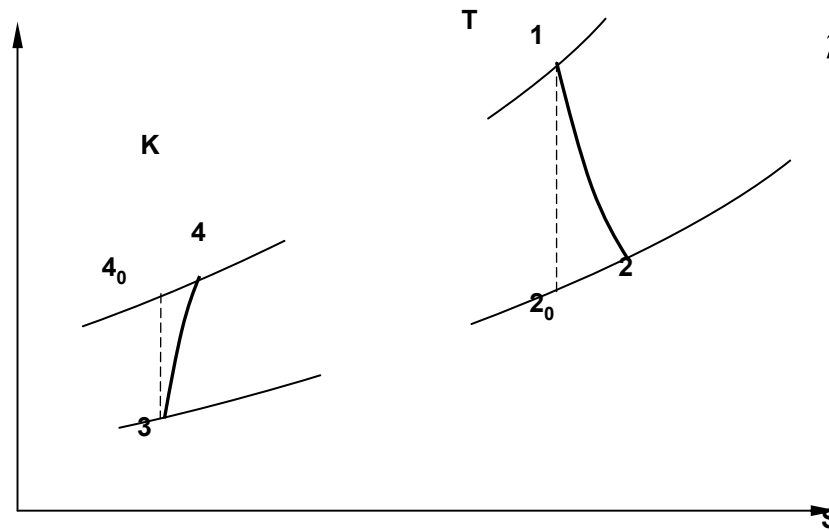
Gázturbina

- **T belső teljesítmény:** $\dot{W}_T = \dot{m}_1 (h_1 - h_2)$
- **K belső teljesítmény:** $\dot{W}_K = \dot{m}_3 (h_4 - h_3)$
- **GT teljesítmény:** $P_{GT} = (\dot{W}_T - \dot{W}_K) \eta_{mGT} \eta_G \eta_{Tr}$
- **Tüzelőhő-teljesítmény:**

$$\dot{Q}_{\ddot{u}} = \frac{\dot{m}_{\ddot{u}} H_{\ddot{u}}}{\eta_{\dot{E}}} = \dot{m}_1 h_1 - (\dot{m}_3 h_4 + \dot{m}_{\ddot{u}} h_{\ddot{u}})$$

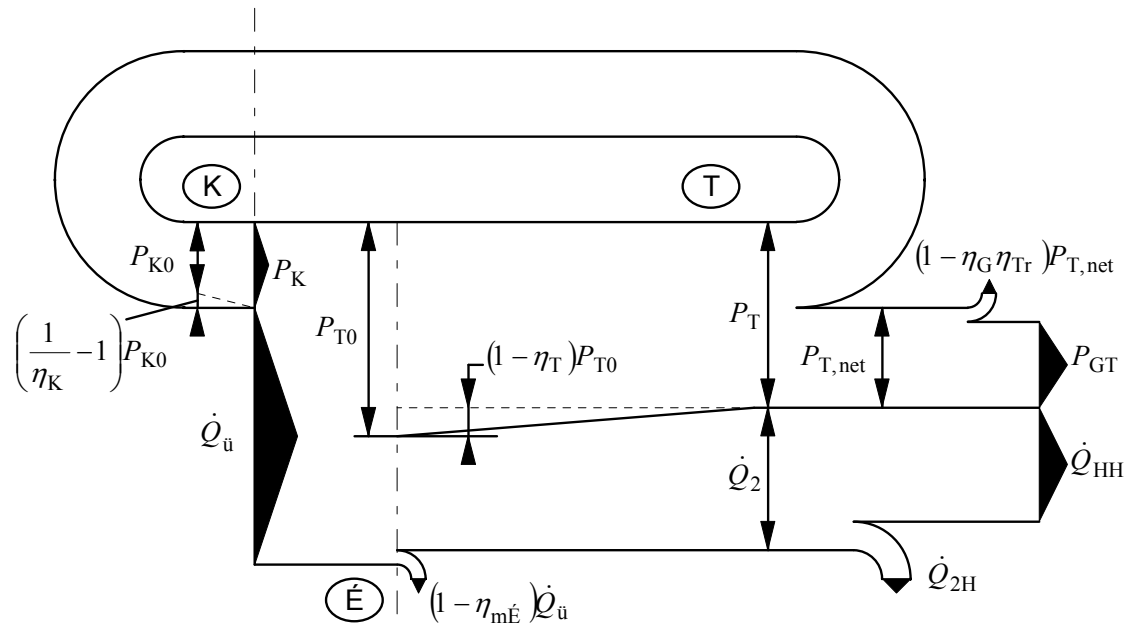
Fokozati és eredő hatásfok

$$\eta_{irrK} = \frac{\frac{T_{4o}}{T_3} - 1}{\left(\frac{T_{4o}}{T_3}\right)^{\frac{1}{\eta_{irrKf}}}} \cdot \tau$$



$$\eta_{irrT} = \frac{1 - \left(\frac{T_{2o}}{T_1}\right)^{\eta_{irrTf}}}{1 - \frac{T_{2o}}{T_1}}$$

Energiafolyam ábra



Energetikai jellemzők

- **A villamosenergia-termelés hatásfoka:**

$$\eta_{GT} = \frac{P_{GT}}{\dot{Q}_{\ddot{u}}} = \frac{(\dot{W}_T - \dot{W}_K) \eta_{\dot{E}} \eta_{mGT} \eta_G \eta_{Tr}}{\dot{m}_{\ddot{u}} H_{\ddot{u}}} = (0,25 - 0,35) J_E / J_{\ddot{u}}$$

- **Fajlagos tüzelőhő-felhasználása:**

$$q_{GT} = \frac{1}{\eta_{GT}} 3600 = (14400 - 10280) kJ_{\ddot{u}} / kWh_E$$

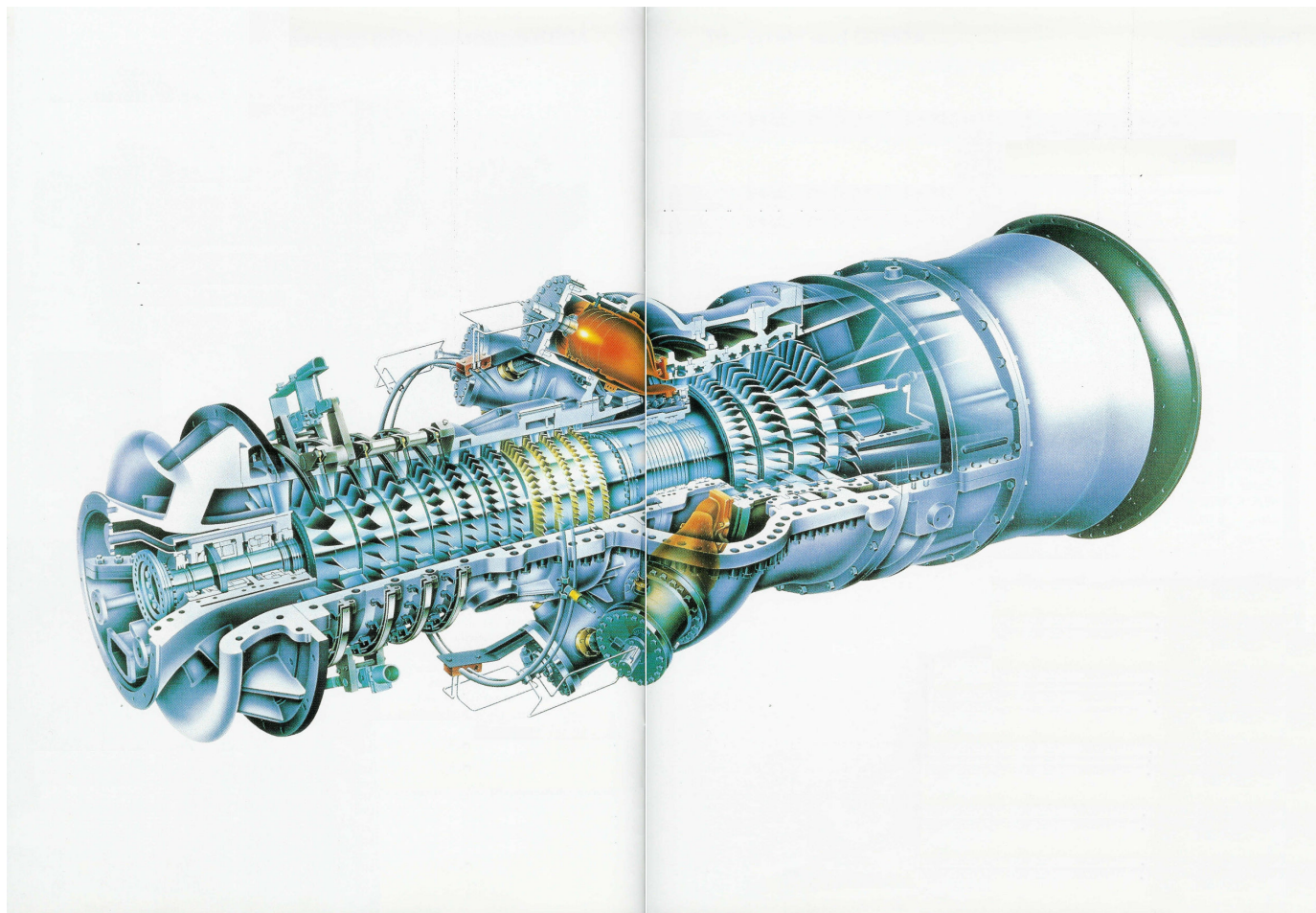
Gázturbina

- $p_1=10-12$ (20-30) bar, $t_1=1000-(1300-1500)$ °C,
- $p_2=1$ bar (légekör), $t_2=520-560-600$ °C.
- A körfolyamat Carnot hatásfoka:

$$\eta_c = 1 - \frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_1} = 0,35 - 0,50$$

- t_1 növelése Ni-Cr szuperötvözetű lapátokkal, s rajtuk speciális kerámia-ötvözetű bevonatokkal, miközben t_2 is nő.
- Környezeti hatások: NO_x ($t_{\text{láng}}=1100-1500$ °C)
→ égőtér kialakítás, vízbefecskendezéssel hűtés.

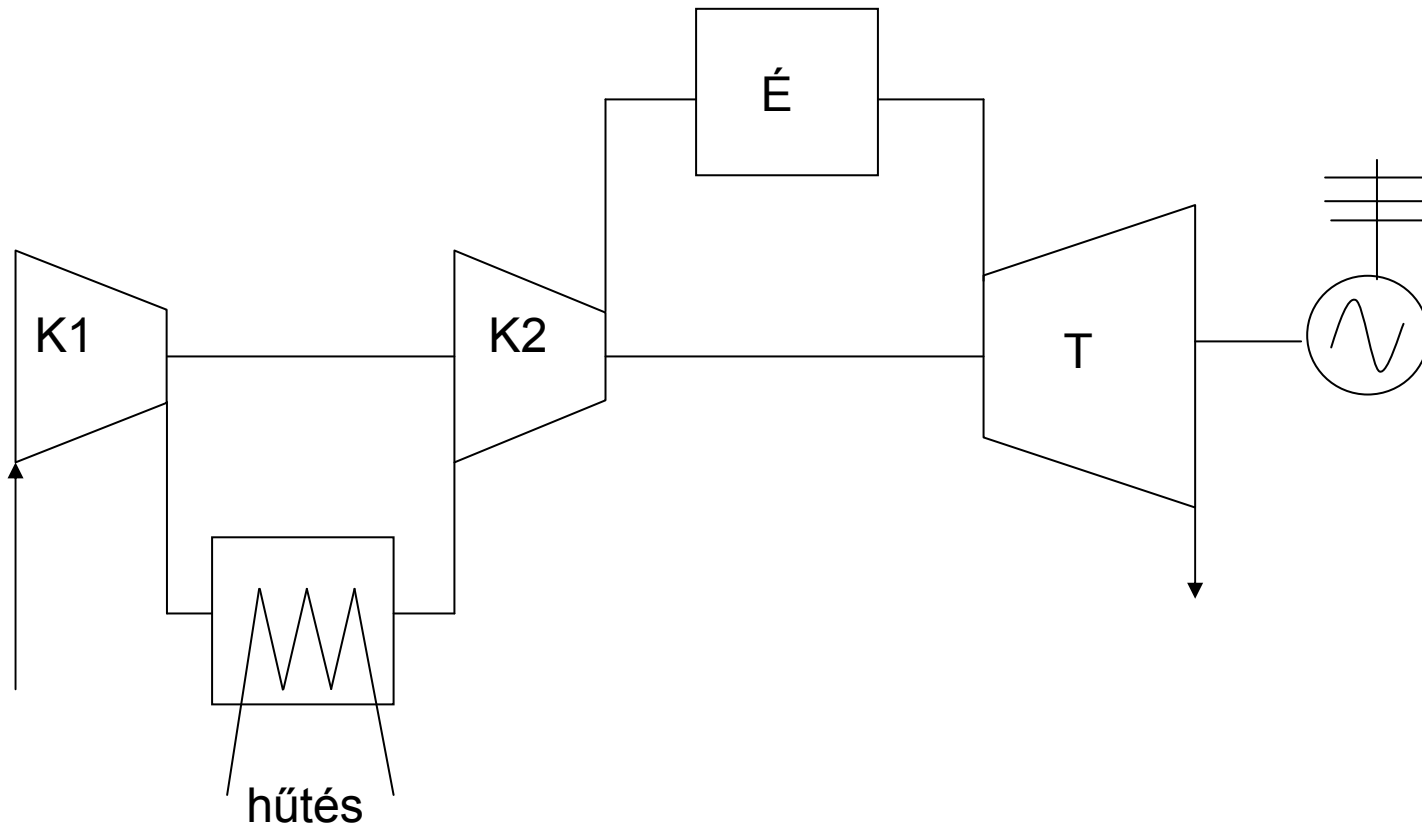
Gázturbina



Hatásfokjavítás

- **Kombinált gáz-gőz erőművek.**
- **A kilépő hőáramot maga a gázturbina hasznosítja:**
 - hőregenerálás,
 - gőztermelés és gőzbefecskendezés (STIG),
 - légnedvesítés.
- **Többfokozatú kompresszió és expanzió.**

Hőregenerálás



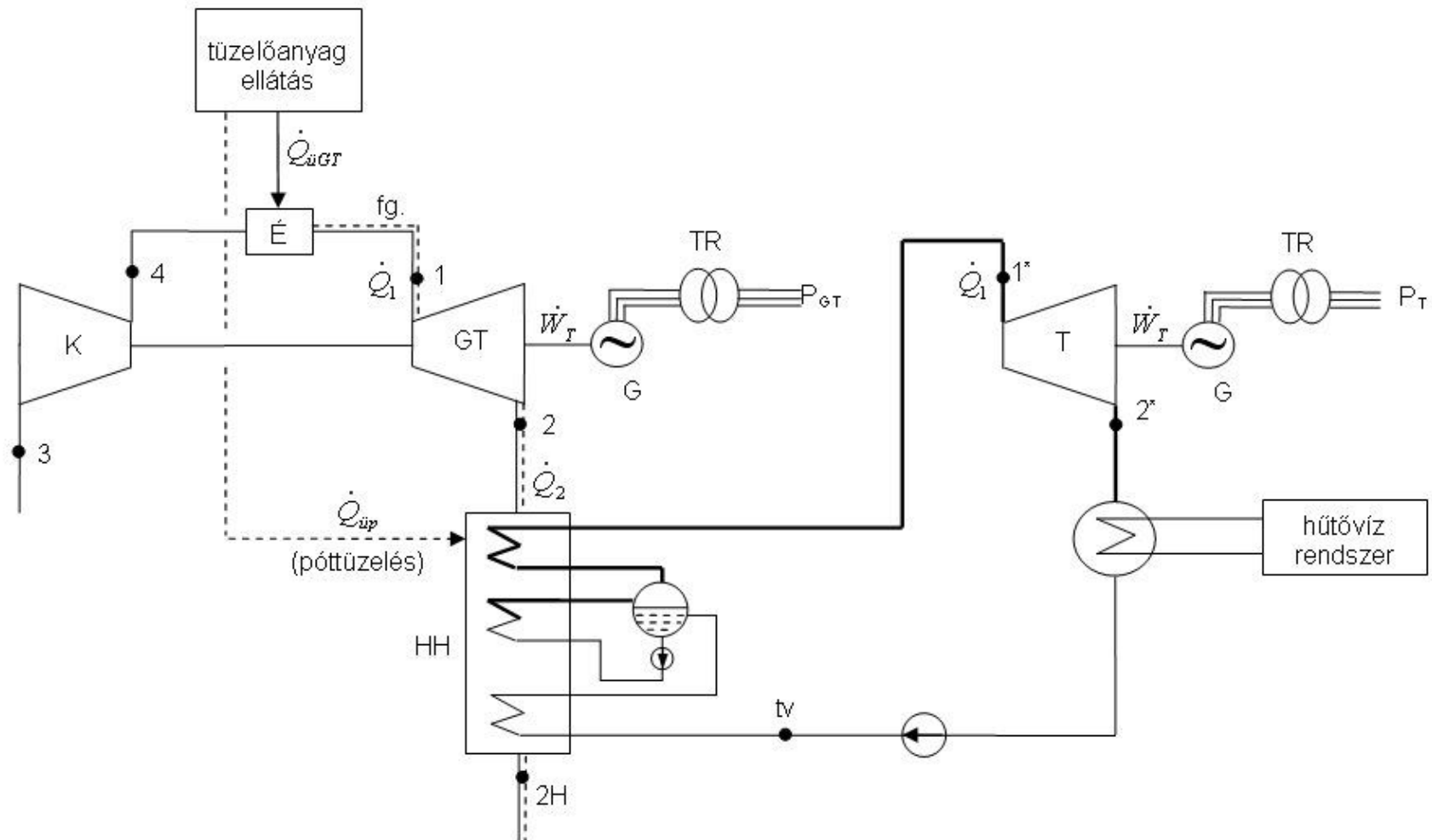
6.3.

**Kombinált gáz-gőz
erőművek**

Kombinált gáz-gőz erőmű

- Gázturbinából kilépő füstgáz hőmérséklete túl nagy ($t_2 > 500$ °C), a füstgáz lehűthető hőhasznosító gőzkazánban, s a termelt gőz gőzturbinában expandál → füstgáz és gőz munkaközegű turbinák kombinációja (kombinált gáz-gőz erőmű).
- *Hőhasznosító gőzkazán:* gázturbinában expandált füstgáz (520-600 °C) lehűtése (180-100 °C-ig), kis- (<40 bar) és közepes (60-90 bar) nyomású gőz termelése. Póttüzelés lehetséges.

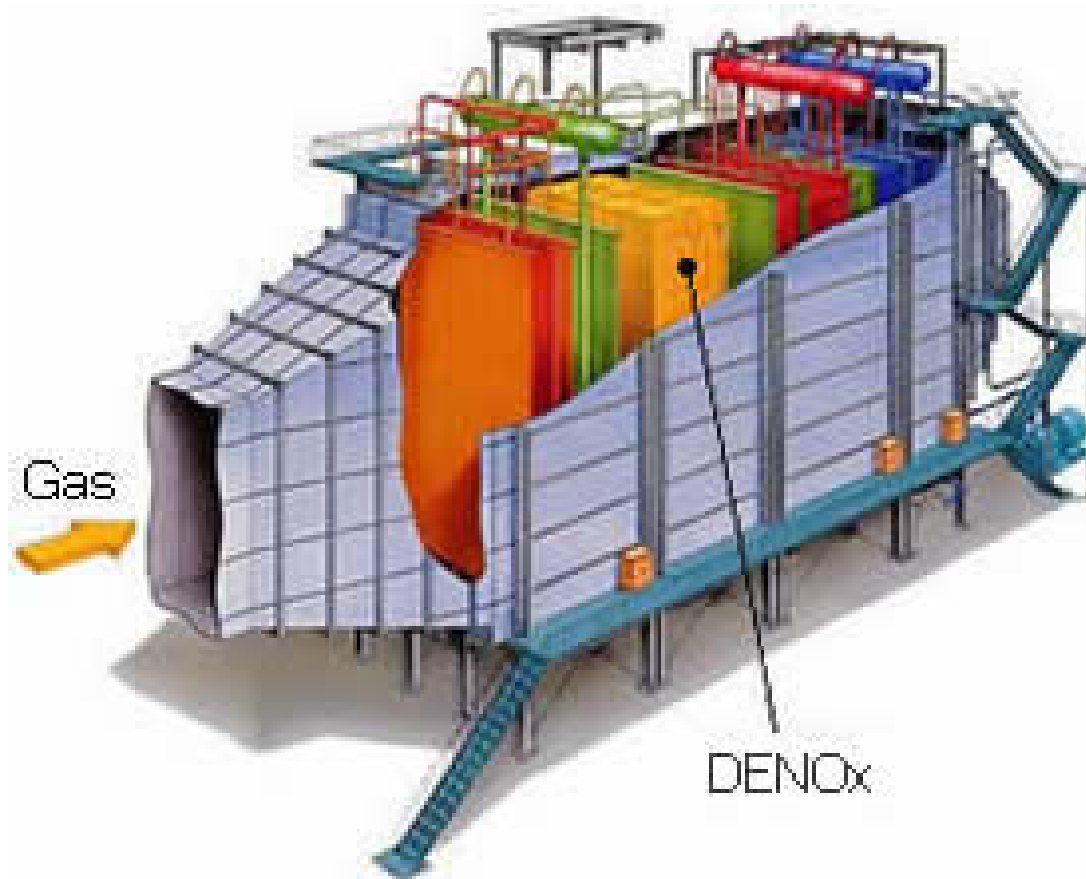
Kombinált gáz-gőz erőmű kapcsolása



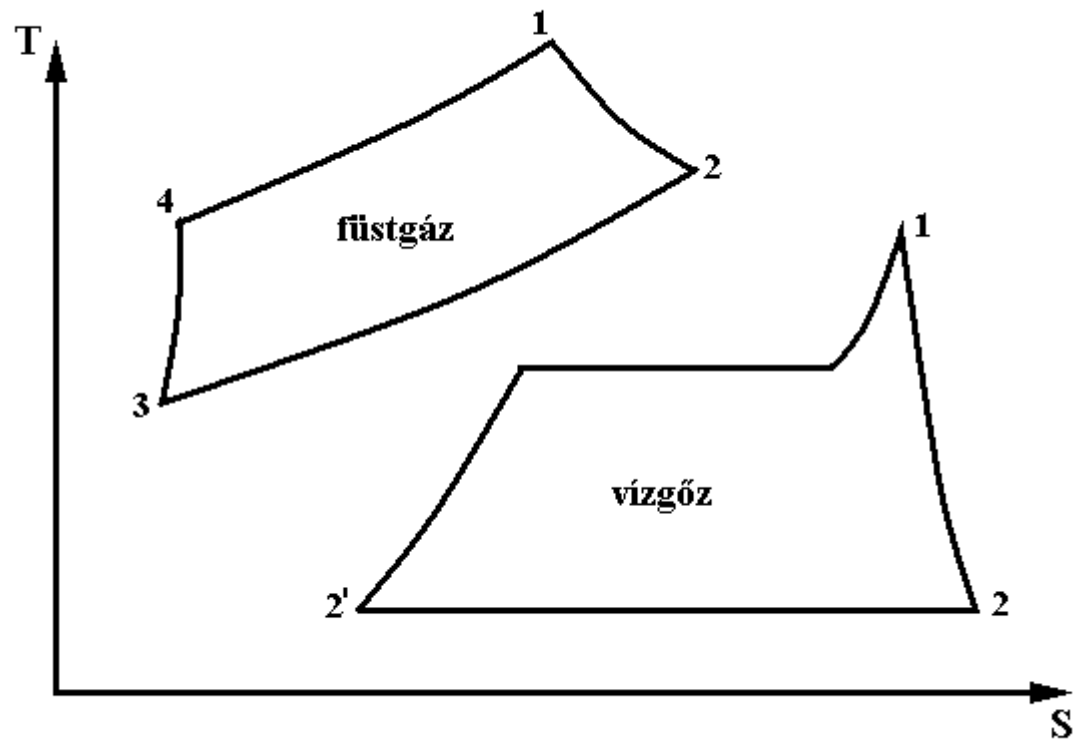
GE LM6000 PD gázturbina generátor set



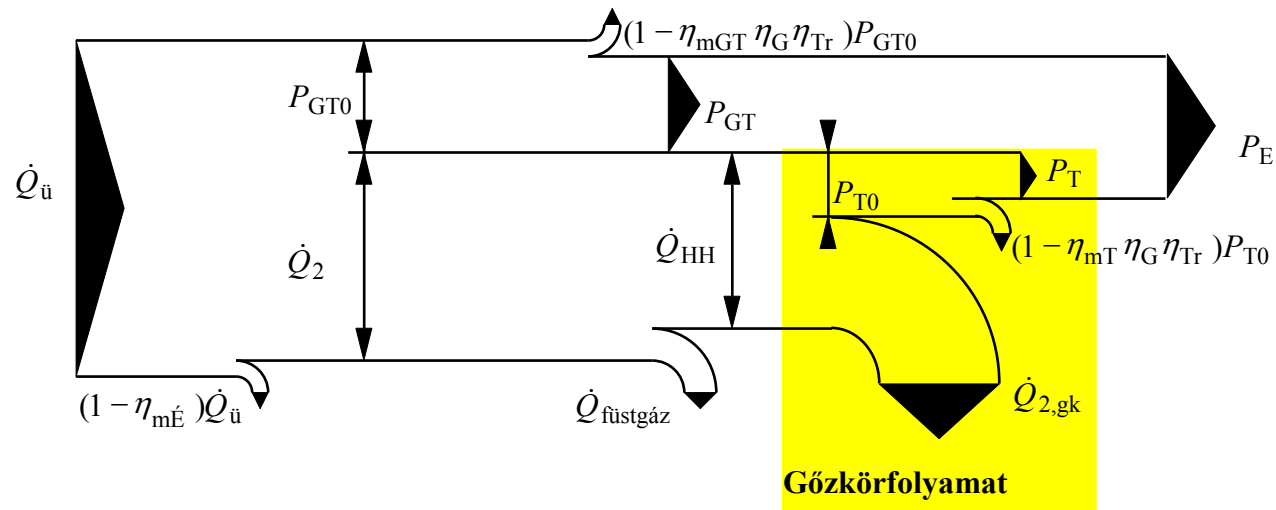
Vízszintes elrendezésű hőhasznosító gőzkazán



Hőkörfolyamat



Energiafolyam ábra



Teljesítménymérleg

- **HH hőteljesítmény:**

$$\dot{Q}_{HH} = \dot{m}_{1fg} \bar{c}_{fg} (t_2 - t_{2H}) = \dot{m}_{1g} (h_1 - h_{tv})$$

- **Turbina teljesítmények:**

$$P_E = P_{GT} + P_T$$

$$P_T \approx \frac{1}{2} P_{GT}$$

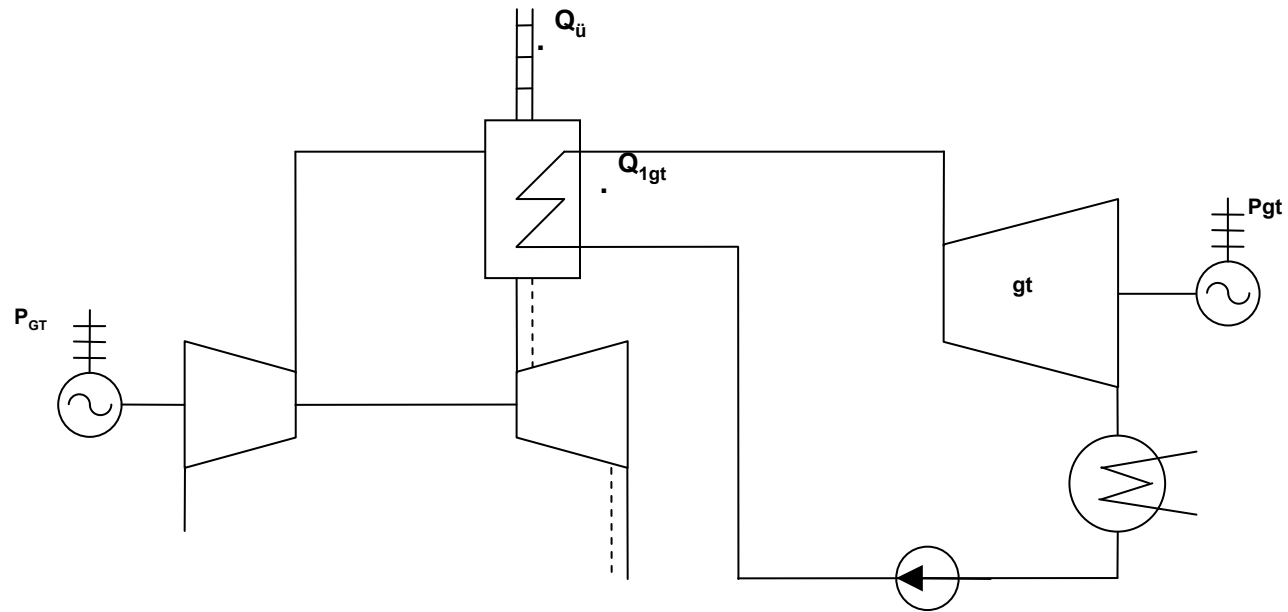
Villamosenergia-termelés

- **Hatásfok:**

$$\eta_E = \frac{P_E}{\dot{Q}_{\ddot{u}}} = \frac{P_{GT} + P_T}{\dot{Q}_{\ddot{u}E} + \dot{Q}_{\ddot{u}p}} = (0,45 - 0,55) J_E / J_{\ddot{u}}$$

- **$q_E = 8000 - 6500 \text{ kJ}_{\ddot{u}} / \text{kWh}_E$.**

Feltöltött kazánban integrált G/G erőmű



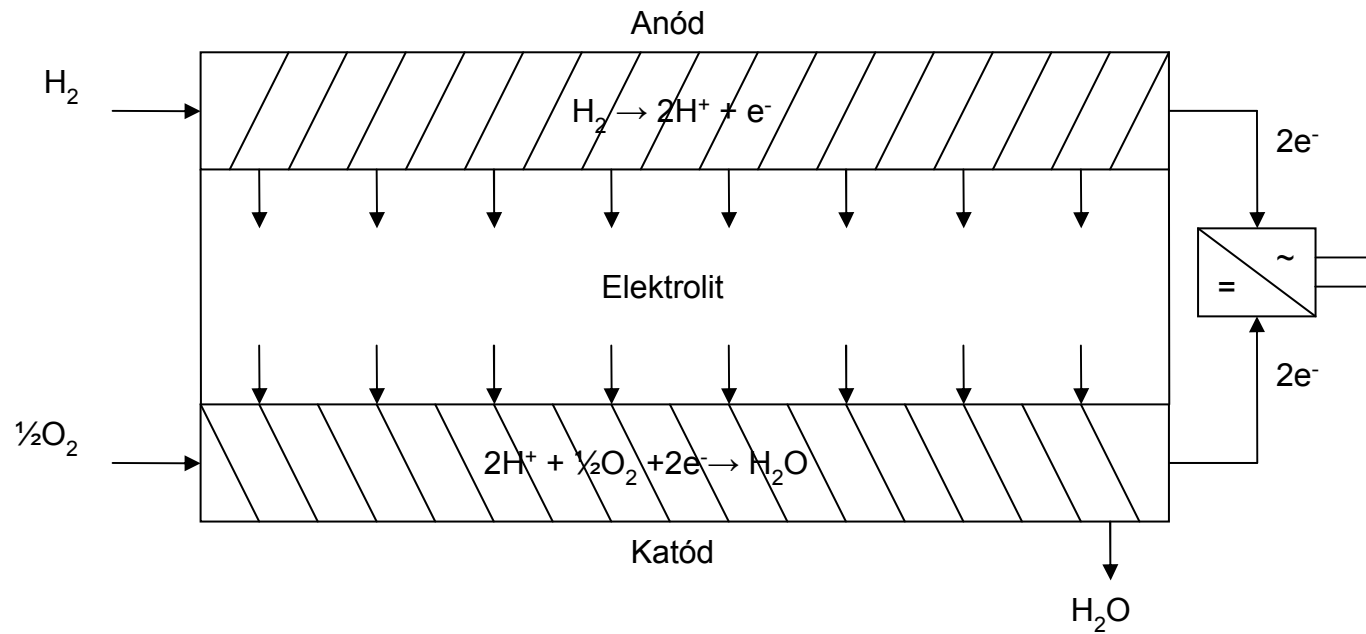
6.4. témakör

Tüzelőanyag-cellák

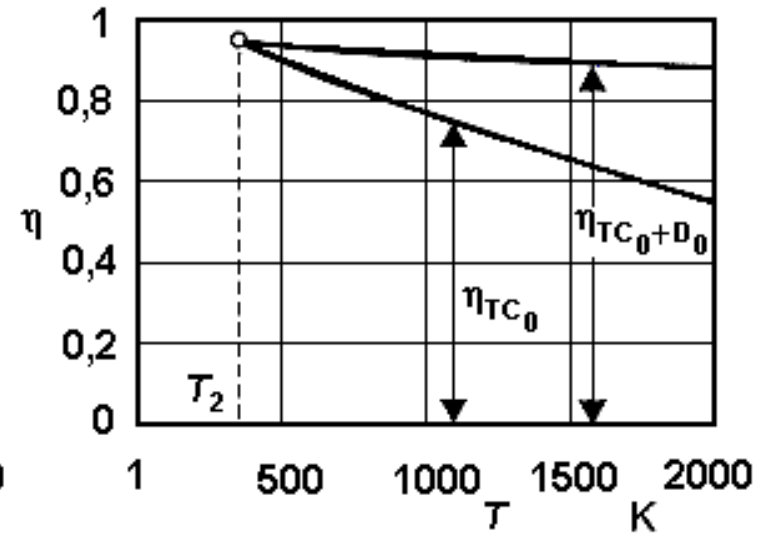
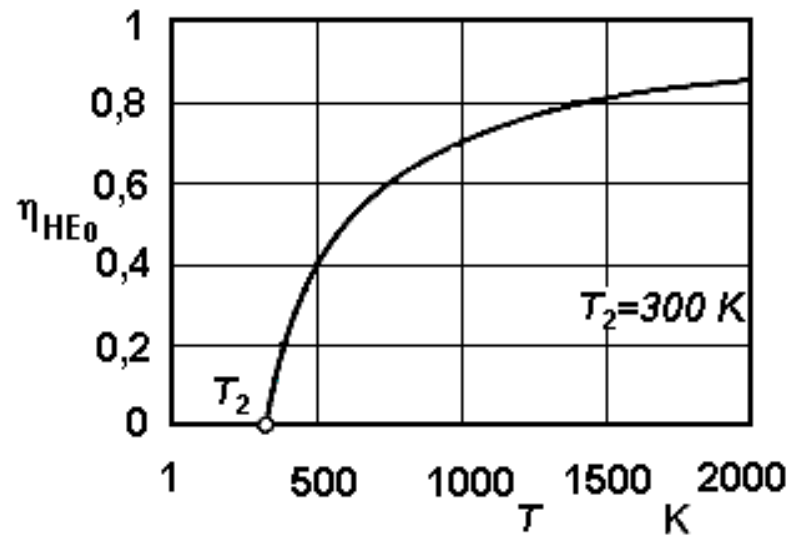
Tüzelőanyag-cellák

- ***Tüzelőanyag-cella (TC): a tüzelőanyagból – a reagensek közötti elektrokémiai reakciók révén – közvetlenül villamos energiát termel. (Az átalakításból kimaradhat a hőtermelés és a hőkörfolyamat, ill. nem jelenik meg a munka).***
 - A TC anódos oldalára áramlik a redukáló, hidrogén-tartalmú tüzelőanyag,
 - katódos oldalára az oxidáló oxigén vagy levegő,
 - $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, és elektronok egyenárama, amit inverterben váltóárammá alakítanak.

Tüzelőanyag-cella



η_{HEo} és $\eta_{TCo} = f(T)$ [Büki]



$$\eta_{HEo} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta_{TCo} = \frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H}$$

Tüzelőanyag-cella

- Tüzelőhő:

$$\Delta Q_{\ddot{u}} = G = \Delta H$$

ΔH a reakciótermékek és reagensek entalpiakülönbsége; Villamos energia

$$E = \Delta G = \Delta H - \Delta S$$

ΔS a reakciótermékek és reagensek entrópiakülönbsége.

Tüzelőanyag-cella

- **A hőmérsékletnöveléssel ugyan csökken a TC hatásfoka, de nő a T hőmérsékleten távozó $D=T\Delta S_i$ disszipációs hő (ΔS_i a reakciótermék (pl. vízgőz) entrópiakülönbsége). A disszipációs hő kapcsolt hőszolgáltatásra vagy gőzerőműben hasznosítható.**
- **A disszipációs hő hasznosításával TC hatásfoka alig csökken a hőmérséklet növelésekor, és az eszményi hatásfok közel azonos.**

Tüzelőanyag-cella

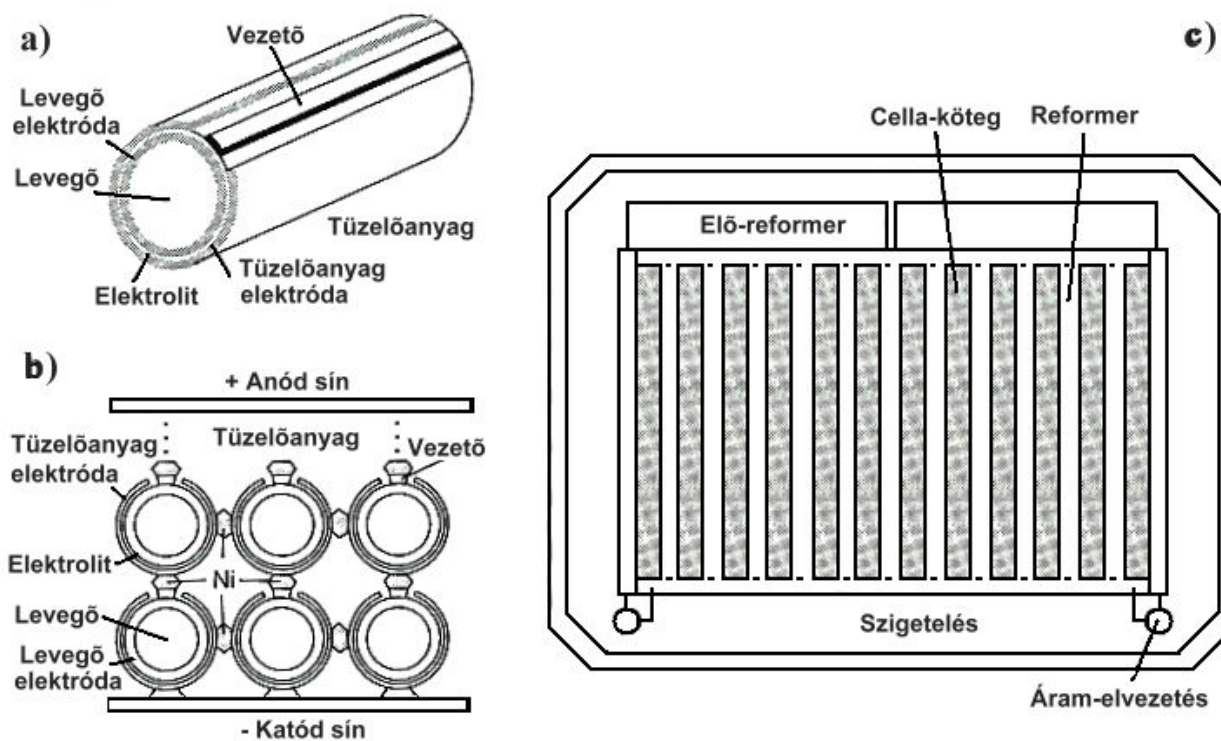
- **TC típusai:**
 - **Alkáli (Alkaline Fuel Cell-AFC),**
 - **Polimer-elektrolit membrános (Polymer Electrolyte Membrane FC-PEMFC),**
 - **Foszforsavas (Phosphoric Acid FC-PAFC),**
 - **Folyékony karbonátos (Molten Carbonate FC-MCFC),**
 - **Szilárd oxidos (Solid Oxide FC-SOFC).**

A fejlesztett TC-k jellemzői [Büki]

<i>A fejlesztett tüzelőanyag-cellák jellemzői</i>						
Jele	Hő- mérséklet °C	Tüzelő- anyag (anód)	Elektrolit, Iontranszport	Oxidáló közeg (katód)	Villamos hatásfok %	Alkalmazás
AFC	40-200	hidrogén	kálilúg(KOH) ← OH ⁻	oxigén	40-50	közlekedés (mozgó)
PEMFC	80		polimer H ⁺ →	levegő, oxigén	40-55	hő-és villamos energia (stabil)
PAFC	200	földgáz, széngáz, biogáz	foszforsav (H ₃ PO ₄) H ⁺ →	levegő	40-45	
MCFC	650		karbonátok (Li ₂ CO ₃ +K ₂ CO ₃) (← CO ₃ ²⁻		50-60	
SOFC	800-1000		keramikus anyag (ZrO ₂) ←O ²⁻		50-60	decentralizált erőművek

SOFC TC [Büki]

a) csőelem, b) csőköteg, c) a teljes cella



SOFC típusú tüzelőanyag-cella felépítése

a) csőalakú elem b) csőköteg c) teljes cella

Tüzelőanyag-cella

- **A teljes TC igen nagyszámú elemből áll. A megvalósított 100-200 kWe, az elemek száma ezernél több, a tervezett 1 MW TC 6-10 ezer elemet tartalmaz.**