

## 5. Elméleti és valóságos körfolyamatok. Értékelési módok

Amikor állapotváltozások sorozatán keresztül ugyanabba az állapotba jut vissza a gáz, körfolyamat játszódik le. Reverzibilis a körfolyamat akkor, ha a környezet maradandó megváltozása nélkül tér vissza a gáz a kiindulási állapotába. Ennek szükséges és elégséges feltétele, hogy az egyes folyamatok kvázisztatikus (egyensúlyi) folyamatok legyenek.

Egy valóságos körfolyamat sohasem reverzibilis, de igen jól megközelítheti azt, ha a körfolyamat egyes állapotváltozásai megfelelően lassan következnek be.

A reverzibilis körfolyamatok az elméleti körfolyamatok. Jól tárgyalhatók matematikailag, és felső közelítést adnak a valóságos körfolyamatok hatásfokára vonatkozóan. (Sok esetben a valóságos körfolyamatok igen jól megközelítik az elméleti körfolyamatokat.) Valóságos körfolyamat vizsgálatánál nagyon sok tényezőt kellene figyelembe venni, emiatt a legtöbb tankönyv csak az elméleti körfolyamatokat tárgyalja.

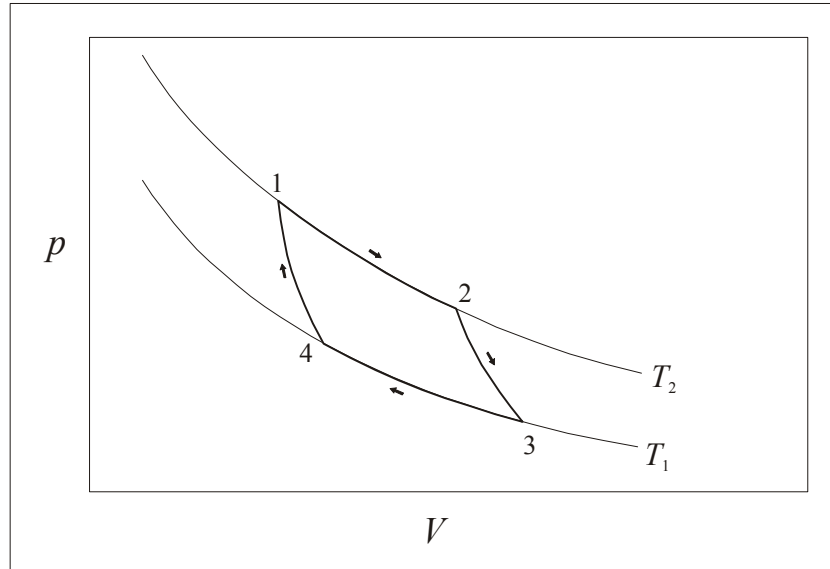
A körfolyamatokat megvalósító gépek a hőerőgépek: hő felvételével munkát végeznek (és le is adnak hőt). Ezt a működést szokás direkt (egyenes) körfolyamatnak vagy ciklusnak nevezni. A körfolyamatok egy része visszafelé is működtethető. Az ilyen gépek a hőszivattyúk vagy hűtőgépek: a környezetük végez munkát a gázon, a gáz hőt vesz fel és máshol (több) hőt lead. Ez a működés az indirekt (fordított) körfolyamat vagy ciklus.

### 5.1. Elméleti Carnot-féle körfolyamat

A 18-19. században szerették volna a hőerőgépek hatásfokát minél jobban növelni. Az első ilyen jellegű vizsgálatokat *Sadi Carnot* végezte (1824)<sup>1,2</sup>. Egy dugattyús hengerbe elzárt  $m$  tömegű ideális gázzal két izotermikus és két adiabatikus állapotváltozásból álló körfolyamatot végzünk. Minden körülmény ideális: nincs súrlódás, nincs a berendezés alkatrészeiben hőveszteség, a folyamatok kvázisztatikus (reverzibilis) módon zajlanak le.

<sup>1</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 398-401

<sup>2</sup> Litz József: Fizika II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 135-139



**5.1. ábra:** Carnot-féle körfolyamat p-V diagramja

Az 1-2 szakasz az izotermikus expanzió (tágulás) szakasza. A hengerbe zárt gáz kapcsolatba kerül egy  $T_2$  hőmérsékletű hőtartállyal, és az onnan felvett hő segítségével tágul, s közben munkát végez. A hőtartály olyan – a vizsgált rendszerhez képest – nagy hőkapacitású eszköz vagy anyag, melynek a hőmérséklete nem változik meg észlelhető módon annak a hatására, hogy a vizsgált rendszernek hőt ad le vagy onnan hőt vesz fel.

A 2-3 szakasz az adiabatikus expanzió szakasza. A hengerbe zárt gázt elszigeteljük a környezetétől, és hagyjuk, hogy adiabatikusan kitáguljon, s közben lehűljön  $T_1$  hőmérsékletre.

A 3-4 szakasz az izotermikus kompresszió (összenyomás) szakasza. A gáz kapcsolatba kerül egy  $T_1$  hőmérsékletű hőtartállyal, s miközben az összenyomás érdekében munkát végünk rajta, hőt ad le a hőtartálynak.

A 4-1 szakasz az adiabatikus kompresszió szakasza. A gázt elszigeteljük a környezetétől, és összenyomjuk úgy, hogy a hőmérséklete ismét  $T_2$  legyen. Majd az egész körfolyamat újraindul.

Az 1-2 szakaszra az első főtétel (2.1 egyenlet) és a 4.25 egyenlet alapján:

$$0 = Q_{\text{fel}} + W_{1-2} \quad (5.1)$$

A gáz által végzett munkát kiszámítható a 2.17 és 4.7 egyenletek segítségével:

$$W_{1-2} = -\int_{V_1}^{V_2} p dV = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_2}{V} dV = -nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.2)$$

A felvett hő tehát:

$$Q_{\text{fel}} = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.2)$$

A 3-4 szakaszra hasonlóképpen kiszámítható a leadott hő:

$$Q_{\text{le}} = nRT_1 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0 \quad (5.3)$$

Az adiabatikus szakaszokra  $Q = 0$ . A 2-3 és 4-1 szakaszokra:

$$\Delta U_{2-3} = c_V m (T_1 - T_2) = W_{2-3} \quad \text{és} \quad \Delta U_{4-1} = c_V m (T_2 - T_1) = W_{4-1} \quad (5.4)$$

A körfolyamatra történő összegzés során  $W_{2-3}$  és  $W_{4-1}$  együttesen 0-t eredményez. A teljes körfolyamat során a gáz  $Q_{\text{fel}}$  hőt vesz fel a  $T_2$  hőmérsékletű hőtartálytól és  $|Q_{\text{le}}|$  hőt ad le a  $T_1$  hőmérsékletű hőtartálynak. Az első főtétel értelmében a kettő különbsége a gáz által összesen végzett munka (hasznos munka).

$$W = Q_{\text{fel}} - |Q_{\text{le}}| \quad (5.5)$$

A hatásfok a hasznos munka és a befektetett hő (felvett hő) hányadosa:

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{fel}}} = \frac{Q_{\text{fel}} - |Q_{\text{le}}|}{Q_{\text{fel}}} \quad (5.6)$$

A 4.32 egyenlet alapján az adiabatikus szakaszokon:

$$T_2 V_2^{\kappa-1} = T_1 V_3^{\kappa-1} \quad \text{és} \quad T_1 V_4^{\kappa-1} = T_2 V_1^{\kappa-1} \quad (5.7)$$

Ebből:

$$\frac{V_3^{\kappa-1}}{V_2^{\kappa-1}} = \frac{V_4^{\kappa-1}}{V_1^{\kappa-1}} \quad \text{azaz} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (5.7)$$

Az 5.2 és 5.3 egyenletek segítségével:

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{fel}}} = \frac{Q_{\text{fel}} - |Q_{\text{le}}|}{Q_{\text{fel}}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (5.8)$$

A (reverzibilis) Carnot körfolyamat hatásfoka általánosan megfogalmazva:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{alacsony}}}{T_{\text{magas}}} \quad (5.9)$$

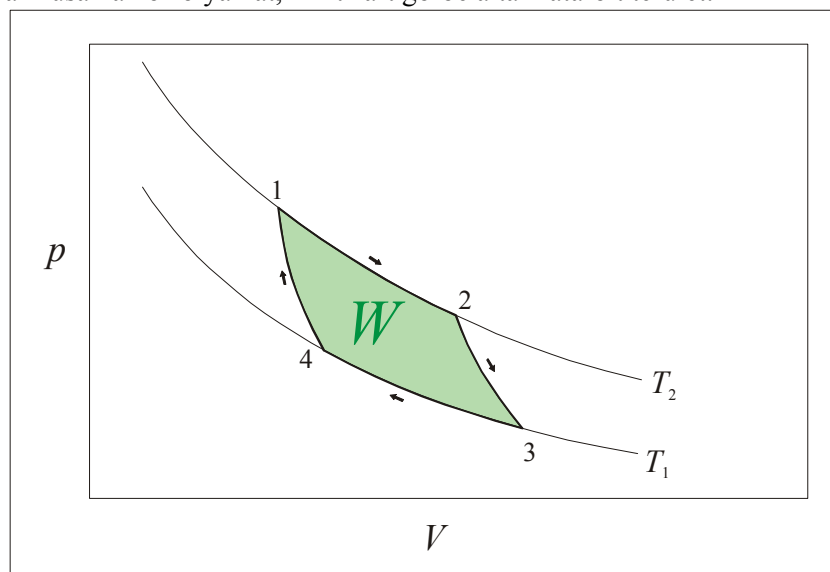
A hatásfok nem függ az anyagi minőségtől.

A második főtétel alapján kimutatható, hogy az 5.9 egyenlettel megadott hatásfok felső határ bármely ciklikusan működő hőerőgép hatásfokára nézve<sup>3</sup>, ezért van a Carnot-féle körfolyamatnak különösen nagy jelentősége.

A körfolyamatból kinyerhető hasznos munka matematikailag megkapható az alábbi kifejezéssel:

$$W = \oint_{\text{körfolyamat}} p dV \quad (5.10)$$

Ez grafikusan a körfolyamat, mint zárt görbe által határolt terület.

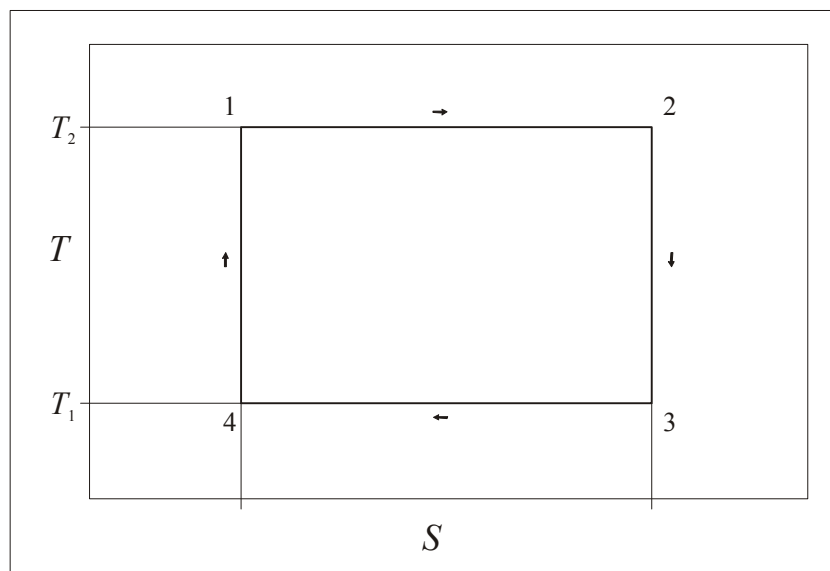


**5.2. ábra:** Carnot körfolyamatból kinyerhető hasznos munka

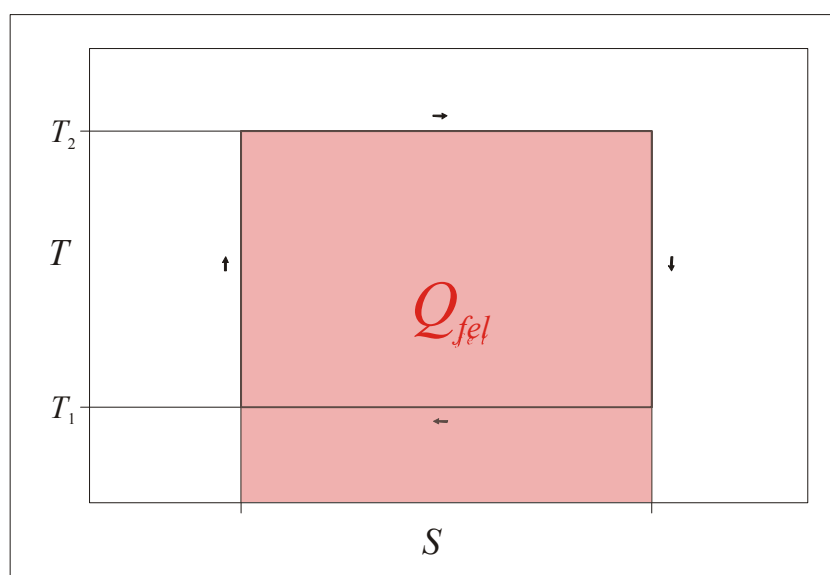
A Carnot körfolyamat tárgyalása sokkal látványosabb a T-S diagram alapján. Két folyamata izoterm, vagyis a képük két vízszintes vonal; két folyamata adiabatikus ( $Q = 0 \rightarrow \Delta S = 0$ ), vagyis képük két függőleges vonal. A teljes körfolyamat a T-S diagramon egy téglalap (5.3. ábra). A körfolyamat során a gáz által végzett hasznos munka e téglalap területe (5.4-6. ábrák).

Ha a körfolyamat az ellenkező irányban zajlik le (indirekt vagy fordított körfolyamat), akkor  $W$  az a munka lesz, amit a közegen a külső erők végeznek. Ennek hatására  $|Q_{\text{le}}|$  hőt vesz fel az alacsonyabb hőmérsékletű hőtartálytól és  $Q_{\text{fel}}$  hőt ad le a magasabb hőmérsékletű hőtartálynak.

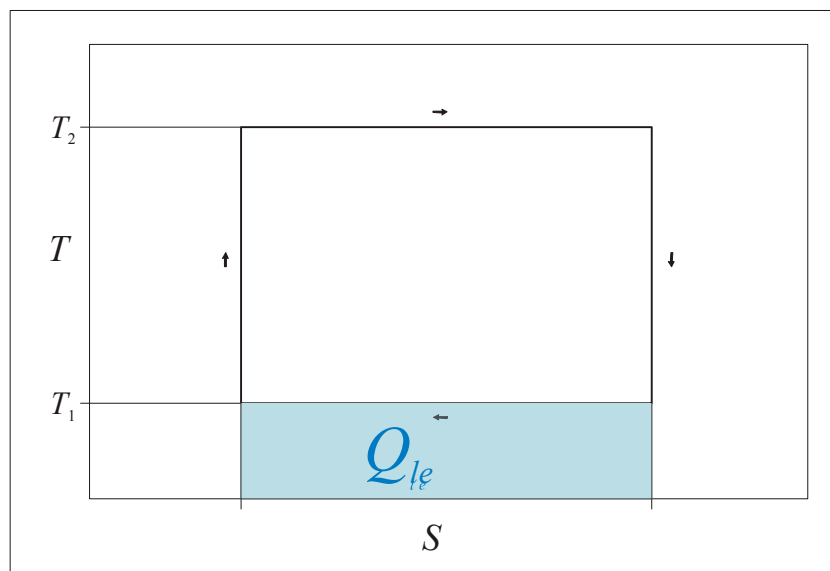
<sup>3</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 405



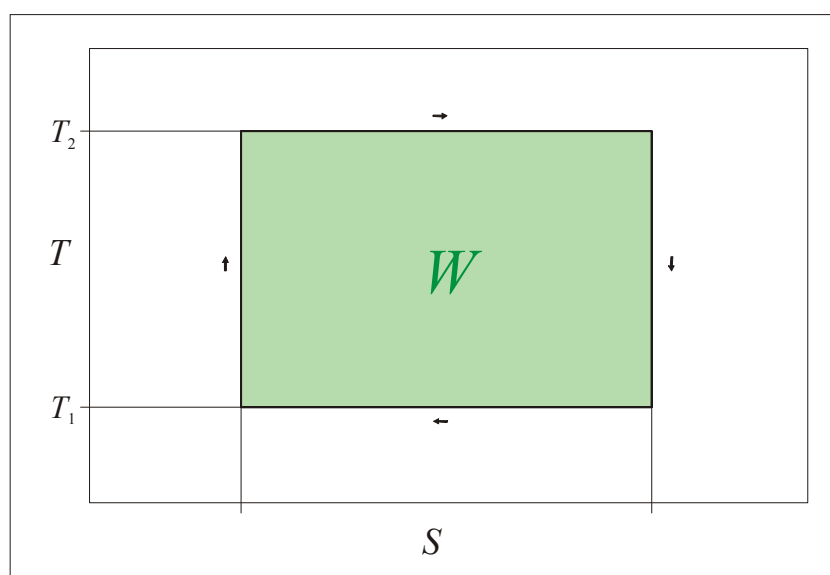
5.3. ábra: Carnot-féle körfolyamat T-S diagramja



5.4. ábra: Carnot-féle körfolyamat során a felvett hőmennyiség



5.5. ábra: Carnot-féle körfolyamat során a leadott hőmennyiség



5.6. ábra: Carnot-féle körfolyamat során a hasznos munka

A fordított Carnot körfolyamatot alkalmazó hőszivattyú vagy hűtőgép *jósági tényezője* ( $\varepsilon$ ) az átvitt „hasznos” hőmennyiség és az átvitelhez szükséges befektetett munka hányadosa<sup>4</sup>.

A hőszivattyú a hideg külső környezetből visz át hőt a belső zárt térbe (fűtés), ezért a jósági tényezője:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{fel}}}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{T_{\text{magas}}}{T_{\text{magas}} - T_{\text{alacsony}}} \quad (5.11)$$

A hűtőgép zárt belső térből visz át hőt a külső környezetnek, ezért a jósági tényezője:

$$\varepsilon = \frac{|Q_{\text{le}}|}{W} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_{\text{alacsony}}}{T_{\text{magas}} - T_{\text{alacsony}}} \quad (5.12)$$

## 5.2 Elméleti Brayton-Joule körfolyamat

A körfolyamatot *George Brayton* mérnök dolgozta ki (1872). A körfolyamatot megvalósító eszközök a gázturbinák, melyeket főleg gázturbinás erőművekben illetve repülőgépmotorokban használnak<sup>5,6</sup>. A fő részei az 5.7 ábrán láthatóak. A kompresszor összesűríti és az égéstérbe juttatja a levegőt. Az égéstérbe juttatják az üzemanyagot is, majd a levegővel elégetik. A forró égéstermékek a turbinán keresztül hagyják el a berendezést, miközben a turbina tengelyét forgásba hozzák, s így mechanikai munkát végeznek. A működés szigorúan véve nem körfolyamat, hiszen a levegő egyfolytában átáramlik a rendszeren és nem tér vissza. De mivel a kompresszor előtt és a turbina után az állapotok nem változnak működés közben, ezért a számítások során tekinthetjük zárt körfolyamatnak. A körfolyamat két izobár és két adiabatikus folyamatból áll. Az izobár folyamatok során az entalpiával kell számolni. Az entalpia a 4.25 egyenlet mintájára felírható az alábbi alakban:

$$H = c_p m T \quad (5.13)$$

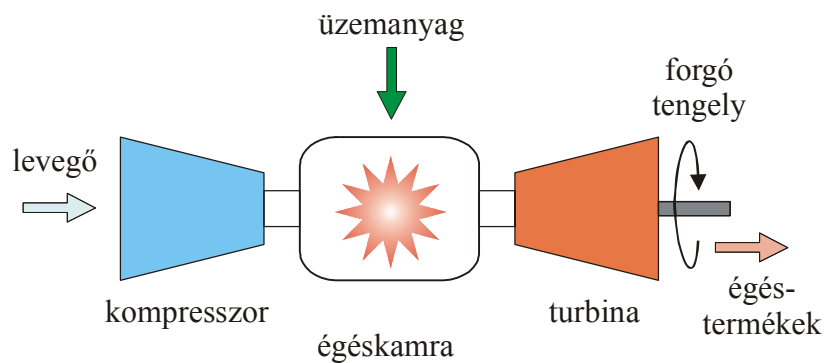
A kompresszor adiabatikus módon összenyomja a levegőt (5.8-10 ábra; 1-2 szakasz). Ezt követően az égéstérben állandó nyomáson az üzemanyag és levegő keveréke elég (hőfelvétel: 5.8-10 ábra; 2-3 szakasz). A forró gázok adiabatikusan kitérülve lehűlnek, miközben munkát végeznek (5.8-10 ábra; 3-4 szakasz).

<sup>4</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 400-401

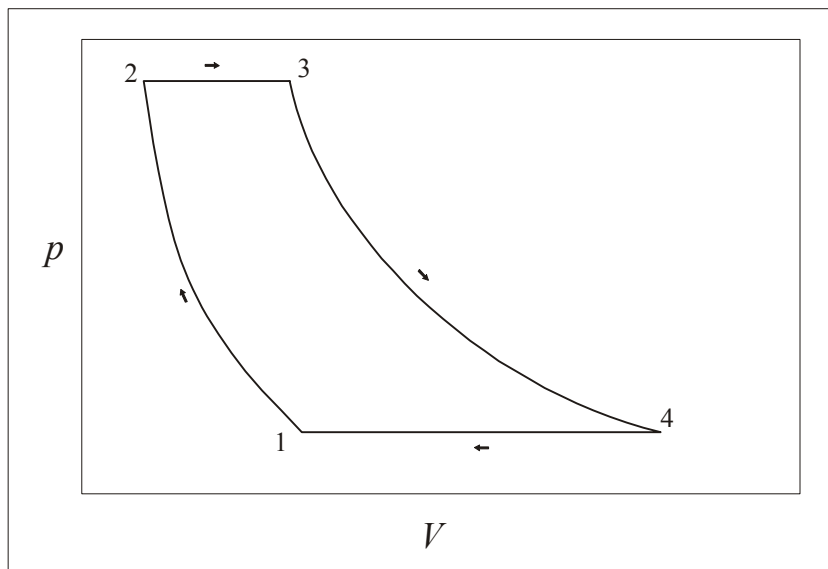
<sup>5</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 477-478

<sup>6</sup> Litz József: Fizika II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 226-227

A turbinából kilépve állandó nyomáson leadják a felesleges hőt a környezetnek (5.8-10 ábra; 4-1 szakasz).

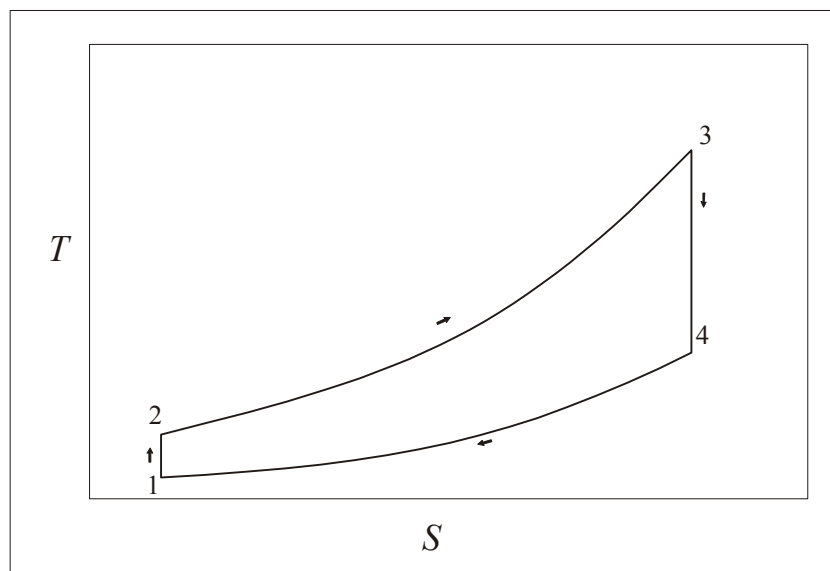


5.7. ábra: Gázturbina elvi felépítése

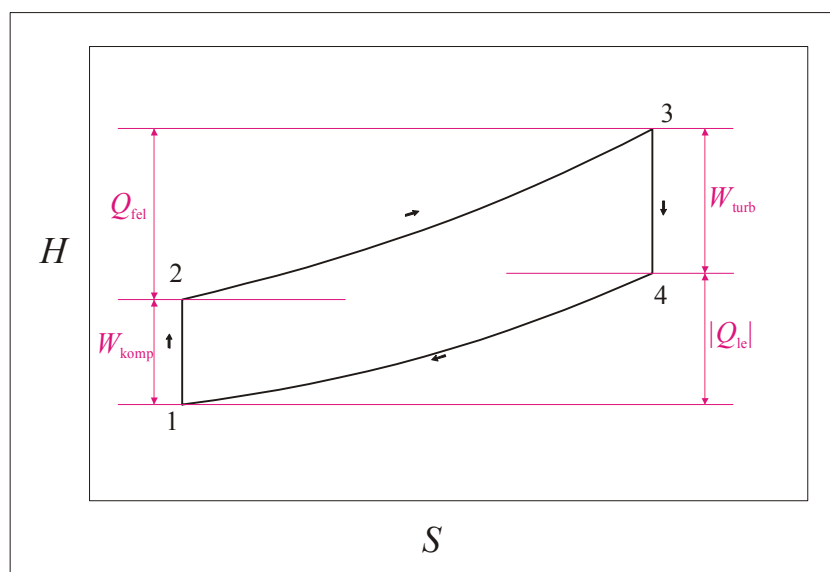


5.8. ábra: Brayton-Joule körfolyamat (gázturbina) p-V diagramja





5.9. ábra: Brayton-Joule körfolyamat (gázturbina) T-S diagramja



5.10. ábra: Brayton-Joule körfolyamat (gázturbina) H-S diagramja

A H-S diagram segítségével összehasonlítható a kompresszor és a turbina munkája, valamint a felvett és leadott hő.

A hatásfok az 5.8 egyenlet alapján számítható:

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{fel}}} = \frac{Q_{\text{fel}} - |Q_{\text{le}}|}{Q_{\text{fel}}} \quad (5.14)$$

A hő felvétele és leadása is állandó nyomáson történik, tehát az entalpia segítségével felírható:

$$Q_{\text{fel}} = H_3 - H_2 = c_p m (T_3 - T_2) \quad (5.15)$$

$$|Q_{\text{le}}| = H_4 - H_1 = c_p m (T_4 - T_1) \quad (5.16)$$

Így a hatásfok:

$$\eta = 1 - \frac{H_4 - H_1}{H_3 - H_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (5.17)$$

A 4.34 egyenlet alapján belátható, hogy a hatásfok:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{p_1^{(\kappa-1)/\kappa}}{p_2^{(\kappa-1)/\kappa}} \quad (5.18)$$

A gázturbina hatásfoka a nyomásviszony növelésével javítható.

A fordított Brayton-Joule körfolyamat (Bell-Coleman körfolyamat) sugárhajtású repülőgépeken használatos légkondicionálásra.

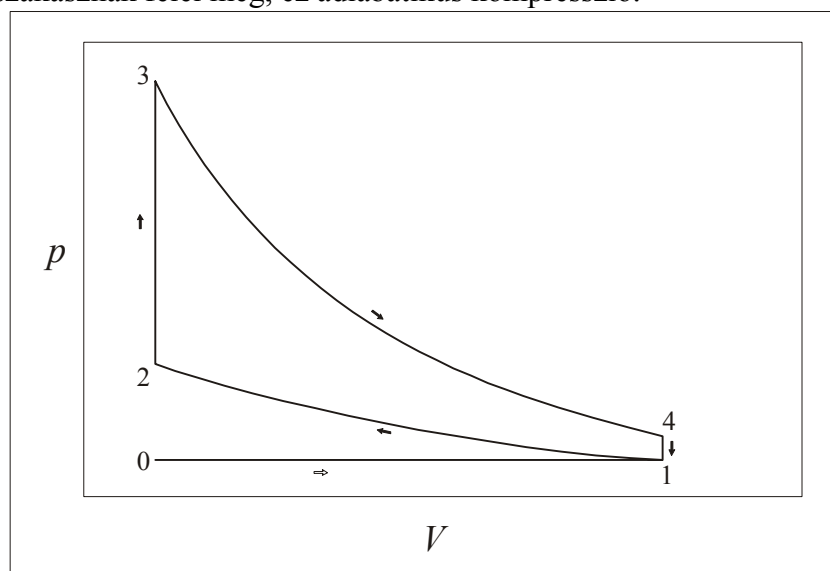
### 5.3 Otto körfolyamat

Az Otto körfolyamat a benzinüzemű belsőégésű motorok működését írja le<sup>7,8</sup> (*Nikolaus August Otto*, 1867). A motor működése négy ütemre bontható. Az első ütem a szívás: a dugattyú a hengerben lefelé mozog, s közben egy nyitott szelepen át levegő-üzemanyag keverék vagy a modernebb típusoknál csak levegő áramlik a hengertérbe. A második ütemnél a dugattyú felfelé mozog, sűríti a levegőt, és minden szelep zárva van. A harmadik ütem kezdetén a sűrített levegő-üzemanyag keveréket meggyújtja egy elektromos szikra (a modern motoroknál a szikra előtt fecskendezik be az égéstérbe az üzemanyagot). A gyors égéssel felhevített gáz nyomása megnő, majd elkezd a dugattyút lefelé mozgatni. A negyedik ütemben a dugattyú felfelé mozog, a kipufogószelep nyitva van, s az égéstermékek távoznak a hengerből. A körfolyamat friss gázkeverékkel újraindul. Az idealizált folyamat két adiabatikus és két izochor folyamatból áll. A körfolyamat p-V diagramja az 5.11 ábrán látható. Az első ütemnek a

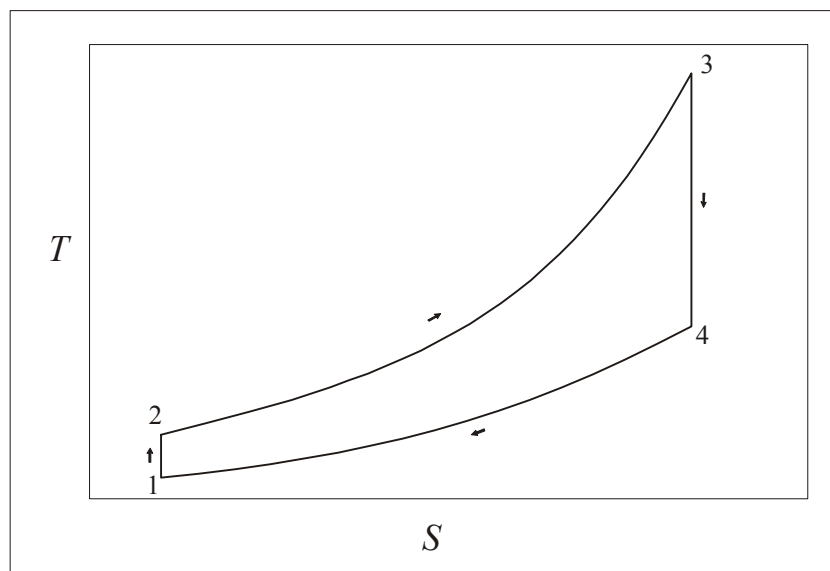
<sup>7</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 476-477

<sup>8</sup> Litz József: Fizika II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 227-228

0-1 szakasz felel meg. A körfolyamat tárgyalásához erre a szakaszra nincs szükség, ezért a diagramon nem is tüntetik fel. A második ütem az 1-2 szakasznak felel meg, ez adiabatikus kompresszió.



5.11. ábra: Elméleti Otto körfolyamat  $p$ - $V$  diagramja



5.12. ábra: Elméleti Otto körfolyamat  $T$ - $S$  diagramja

A harmadik ütem tartalmazza a 2-3 izochor szakaszt és a 3-4 adiabatikus expanziós szakaszt. A negyedik ütem a 4-1 izochor szakasz (hűlés) és az 1-0 szakasz (kipufogás). A körfolyamat során a hőfelvétel a 2-3 szakaszon történik, a hőleadás pedig a 4-1 szakaszon.

A hatásfok az 5.14 egyenlettel adható meg. A 4.32 egyenlet alapján belátható:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{V_2^{\kappa-1}}{V_1^{\kappa-1}} \quad (5.19)$$

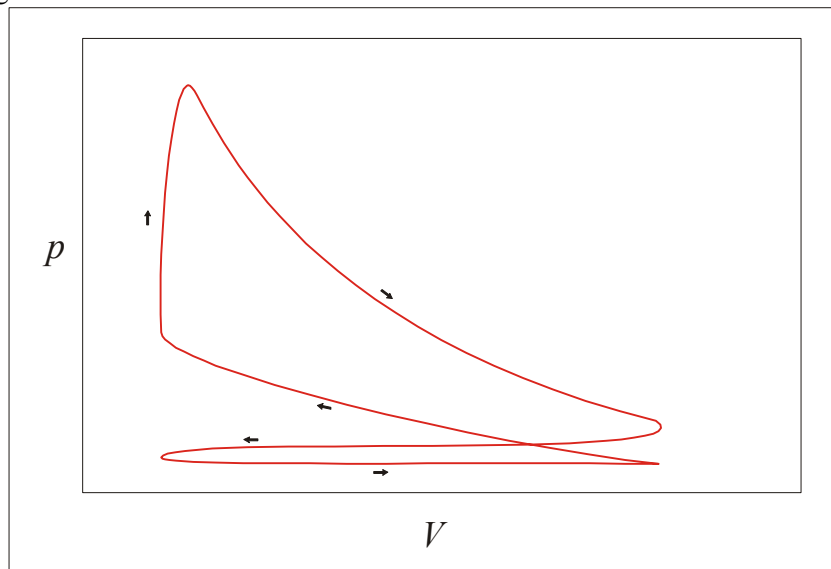
Ha bevezetjük a kompresszióviszonyt ( $\varepsilon = V_1/V_2$ ), akkor a hatásfok:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (5.20)$$

A hatásfok a kompresszióviszony növelésével nő. Ennek határt szab az üzemanyag-levegő keverék öngyulladás, amit el kell kerülni. Benzinmotorok esetén a kompresszióviszony 1:7 – 1:12.

A valóságos benzinmotorok esetében a p-V diagram egy bonyolult görbe, melynek matematikai tárgyalása komplikált. A valódi motorok hatásfoka kisebb, mint az 5.20 egyenlettel számított érték.

Benzinmotorok esetében a kompresszió végnyomása 12-17 bar, az égési csúcshőmérséklet 2000-2500 °C. A motorok tényleges hatásfoka 24-35%.



5.13. ábra: Valódi Otto körfolyamat p-V diagramja

#### 5.4 Elméleti Diesel körfolyamat

A dízelmotor (*Rudolf Christian Karl Diesel*, 1893) működése négy ütemre bontható<sup>9,10</sup>. Az első ütem a szívás: a dugattyú a hengerben lefelé mozog, s közben egy nyitott szelepen át levegő áramlik a hengertérbe. A második ütemnél a dugattyú felfelé mozog, sűríti és felhevíti a levegőt, és minden szelep zárva van. A harmadik ütem kezdetén a komprimált forró levegőbe injektálják a dízelolajat, ami a forró levegő hatására meggyullad, és állandó nyomáson égve elkezd lefelé tolni a dugattyút. Az égés lassabb, mint a benzin égése a benzinmotorban. Az égés végeztével adiabatikus tágulás juttatja el a dugattyút az alsó holtpontra. A negyedik ütemben a dugattyú felfelé mozog, a kipufogószelep nyitva van, s az égéstermékek távoznak a hengerből. A körfolyamat újraindul friss levegővel. Az idealizált folyamat két adiabatikus, egy izobár és egy izochor folyamatból áll. A körfolyamat p-V diagramja az 5.14 ábrán látható.

Az első ütem a 0-1 szakasz; ezt a körfolyamat energodinamikai tárgyalásához nem kell figyelembe venni. A második ütem az 1-2 szakasz. A harmadik ütem (munkaütem) a 2-3 és a 3-4 szakasz együtt. A negyedik szakasz (kipufogás) a 4-1 és 1-0 szakasz együtt.

A számítást hasonlóképpen kell elvégezni, mint az előző esetekben. A végeredményként kapott hatásfok:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \left( \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\kappa(\rho - 1)} \right) \quad (5.21)$$

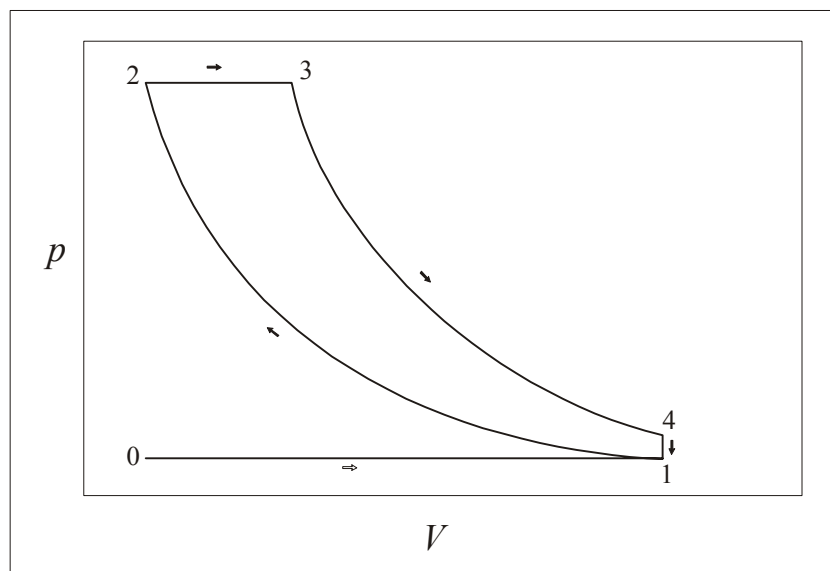
ahol  $\rho = V_3 / V_2$  az égési folyamat végén és kezdetén lévő térfogatok aránya.

Valóságos dízelmotorok esetében a p-V diagram hasonlít a benzinmotorok esetében kapott görbéhez, de nincs rajta kiugró csúcs, kevésbé szögletes (5.16 ábra).

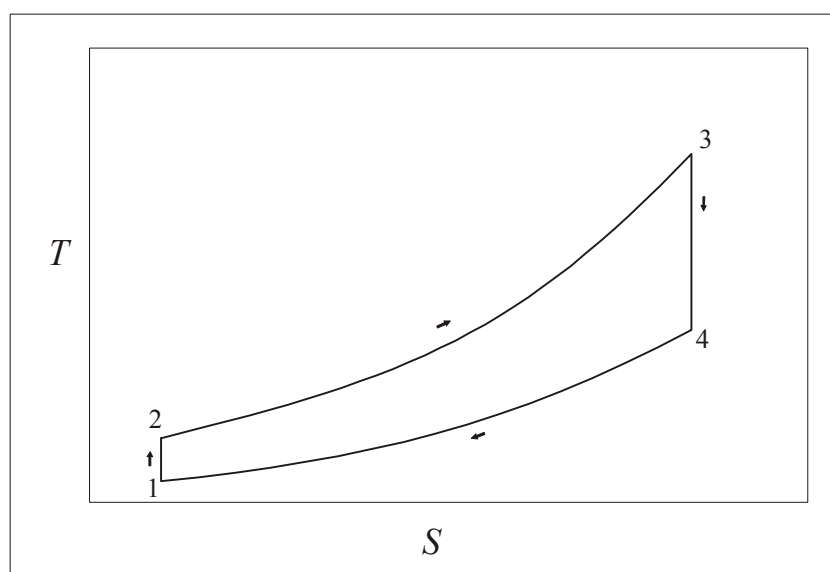
Dízelmotorok esetében a kompresszióviszony 1:16 – 1:22, a kompresszió végnyomása 30-55 bar, az égési csúcsnyomás 60-80 bar, az égési csúcshőmérséklet 2000-2500 °C. A motorok tényleges hatásfoka 32-43%. A dízelmotorok jobb hatásfoka annak köszönhető, hogy ugyan az 5.21 egyenlet kisebb hatásfokot eredményez ugyanakkora  $\varepsilon$ -ra, mint az 5.20 egyenlet, de a dízelmotorokban sokkal nagyobb kompresszió érhető el.

<sup>9</sup> Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, pp. 478

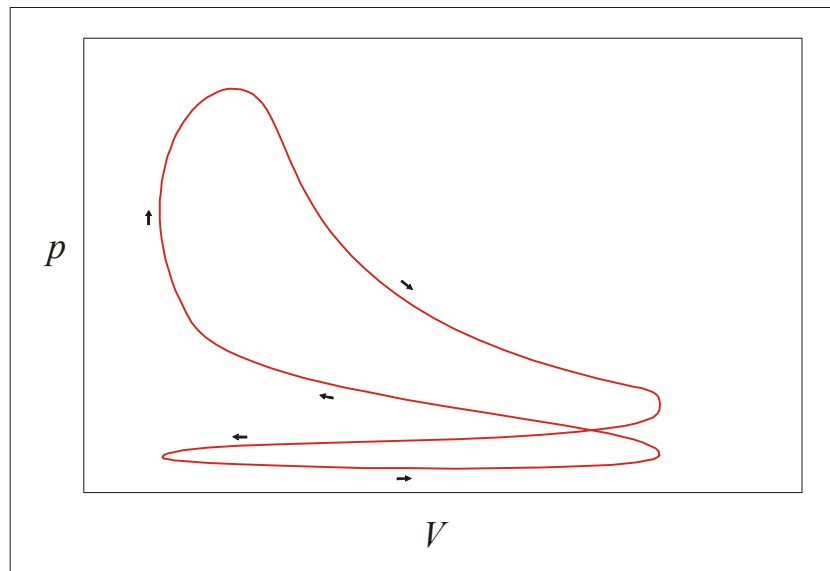
<sup>10</sup> Litz József: Fizika II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 228



5.14. ábra: Elméleti Diesel körfolyamat p-V diagramja



5.15. ábra: Elméleti Diesel körfolyamat T-S diagramja

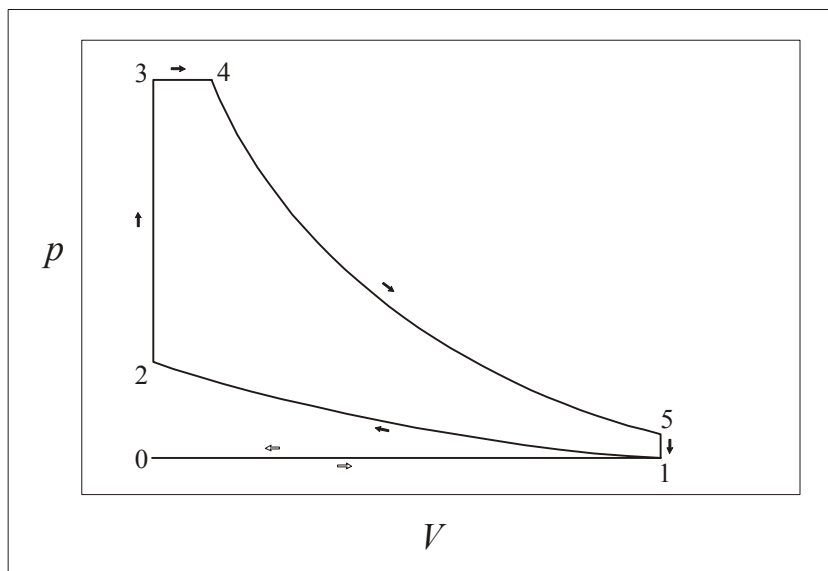


**5.16. ábra:** Valódi Diesel körfolyamat p-V diagramja

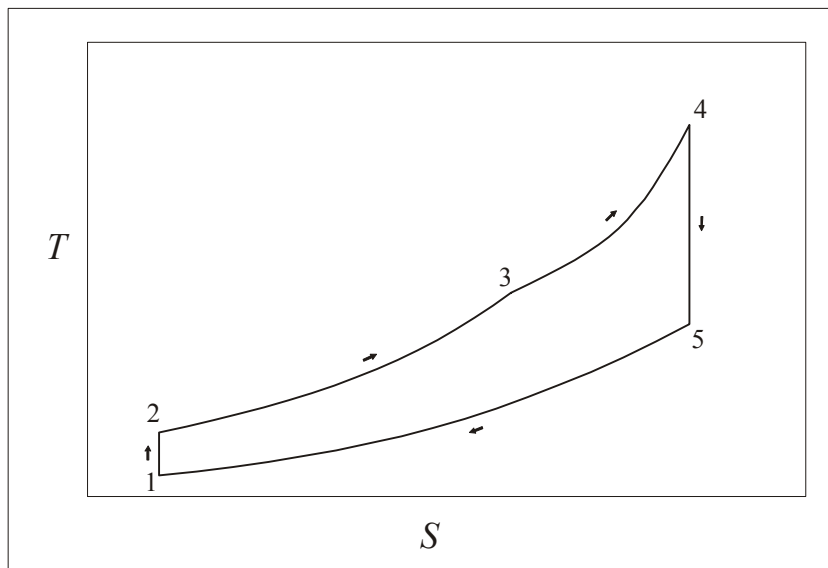
### 5.5 Kevert körfolyamat (Sabathe körfolyamat vagy Seiliger körfolyamat)

A valódi benzin- illetve dízelmotorok körfolyamata matematikailag nehezen kezelhető. Leírásukat jól lehet közelíteni a kevert (Sabathe vagy Seiliger) körfolyamattal (*Myron Seiliger*, 1922; *Sabathe*, 1908). Ez tulajdonképpen az elméleti Otto és az elméleti Diesel körfolyamat keveréke (5.17-18 ábra). A motor működésének első üteme, a szívás (0-1 szakasz) izobár, a második ütem a sűrítés (1-2 szakasz) adiabatikus állapotváltozás. A harmadik ütem (munkaütem) részben izochor, részben izobár és részben adiabatikus állapotváltozás: az égés elején a dugattyú a felső holtponton van, s egy ideig a térfogat állandó (2-3 szakasz), majd a dugattyú elindul, miközben az üzemanyag még mindig ég, s ekkor a nyomás tekinthető állandónak (3-4 szakasz). Az égés végeztével a forró gázok adiabatikusan kitérülnek (4-5 szakasz). A negyedik ütem (kipufogás) ugyanolyan, mint az elméleti Otto vagy Diesel körfolyamatnál (5-1 és 1-0 szakaszok).

Ha benzinmotort tárgyalunk a kevert körfolyamat segítségével, akkor az izochor szakasz a hosszabb (2-3 szakasz), ha dízelmotort, akkor az izobár (3-4 szakasz).



5.17. ábra: Ideális kevert (Sabathe, Seiliger) körfolyamat p-V diagramja



5.18. ábra: Ideális kevert (Sabathe, Seiliger) körfolyamat T-S diagramja



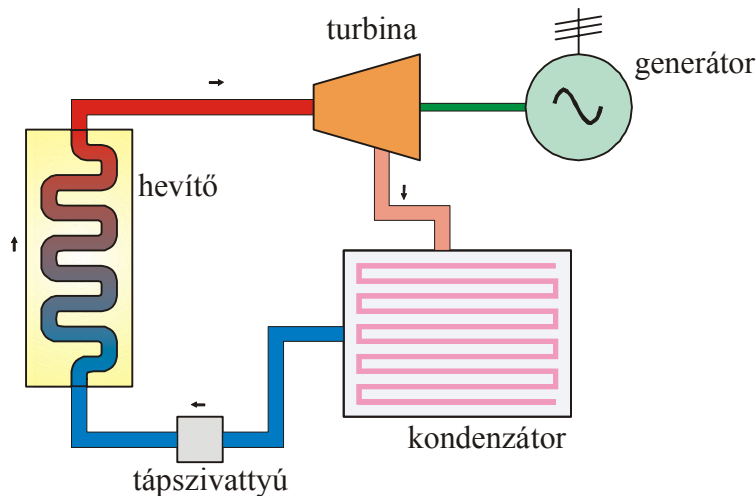
A hatásfok:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\rho^{\kappa} \lambda - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)} \quad (5.22)$$

ahol  $\rho = V_4 / V_3$  az égési folyamat végén és kezdetén lévő térfogatok aránya,  $\lambda = p_3 / p_2$  pedig az égési folyamat végén és kezdetén lévő nyomások aránya.

### 5.6 Rankine-Clausius körfolyamat

A villamosenergia-termelésben résztvevő erőművek jelentős számban Rankine-Clausius-féle gőzkörfolyamatot<sup>11,12</sup> (*William John Macquorn Rankine*, 1859) megvalósító erőművek (hőerőművek, atomerőművek). A berendezés négy fő egységből áll (5.19 ábra). A tápszivattyú nagy nyomással továbbítja a vizet a hevítő (kazán, atomreaktor) felé. A hevítőben a vizet felmelegítik, elforrallják, és többnyire a vízgőzt túl is hevítik. A turbinában a vízgőz munkát végez (tengelyt megforgat, s ezzel hajtják meg a villamos generátort), s közben lehűl. A kondenzátorban a gőz leadja a maradék hőt, és vízzé kondenzálódik. Innen újra a tápszivattyúba kerül.

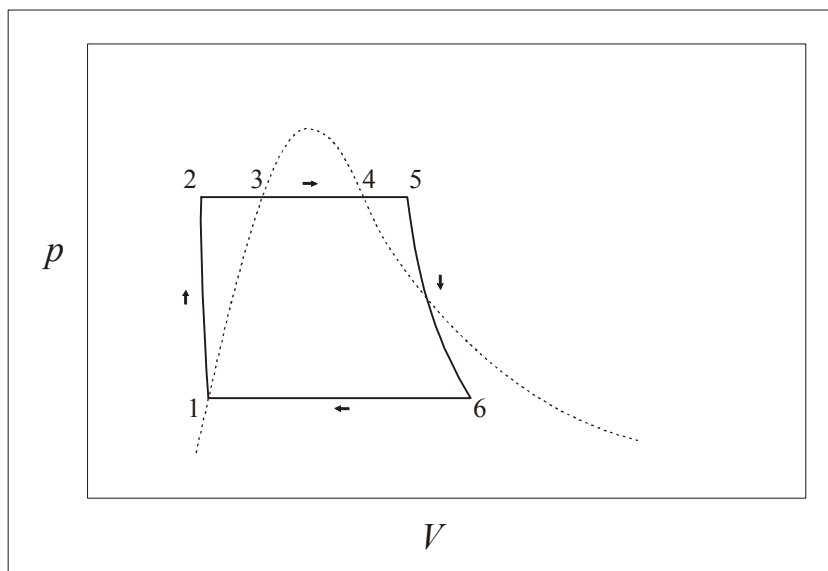


5.19. ábra: Rankine körfolyamatot megvalósító gőzturbinás erőmű elvi felépítése

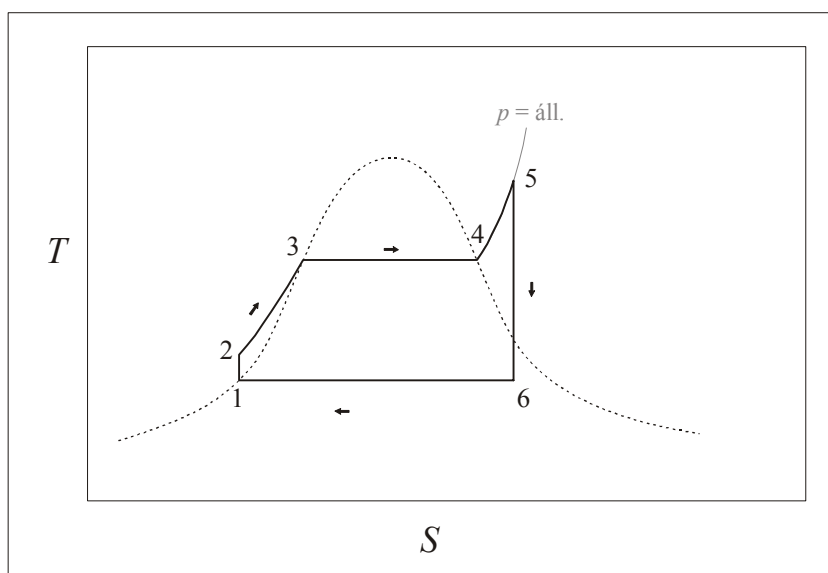
<sup>11</sup> Vajda György: Energetika II. ,Akadémiai Kiadó, Budapest, 1984, pp. 120-127

<sup>12</sup> Litz József: Fizika II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 225-226

A körfolyamat p-V és T-S diagramja látható az 5.20 és 5.21 ábrákon.



5.20. ábra: Rankine-Clausius körfolyamat p-V diagramja



5.21. ábra: Rankine-Clausius körfolyamat T-S diagramja

A szaggatott vonal a víz fázisait elválasztó határoló görbe. A ciklus az 1 pontban indul. Az 1-2 szakaszon a tápszivattyú megnöveli a víz nyomását és eljuttatja a hevítőbe. A 2-3, a 3-4 és a 4-5 szakasz a hevítőben játszódik le: a víz először forrpontra felmelegszik (2-3), majd elforr (3-4; nedves gőz), és a forró gőz tovább lesz hevítve (4-5; száraz gőz). Az 5-6 szakaszon a gőz a turbinában munkát végez, s közben lehűl és a nyomása is lecsökken. A turbinából kijutó gőzt a kondenzátorban hűtéssel cseppfolyósítják (6-1 szakasz). A víz újra a tápszivattyúba kerül.

A hatásfok számításához az entalpiákat kell figyelembe venni. A betáplált hő a víz(gőz) entalpiájának változásával egyenlő:

$$Q_{\text{fel}} = H_5 - H_2 \quad (5.23)$$

A leadott hő:

$$|Q_{\text{le}}| = H_6 - H_1 \quad (5.24)$$

A tápszivattyú munkája:

$$W_{\text{sz}} = H_2 - H_1 \quad (5.25)$$

A turbina munkája:

$$W_{\text{turb}} = H_5 - H_6 \quad (5.26)$$

A hatásfok:

$$\eta = \frac{W_{\text{turb}} - W_{\text{sz}}}{Q_{\text{fel}}} = \frac{(H_5 - H_6) - (H_2 - H_1)}{H_5 - H_2} \quad (5.27)$$

A legtöbb esetben a tápszivattyú munkája elhanyagolható a turbina munkája mellett, így a hatásfok:

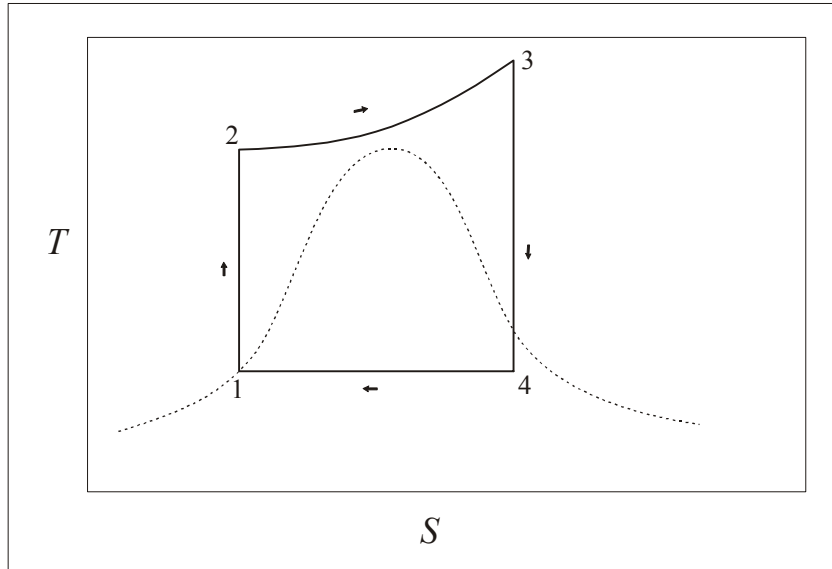
$$\eta = \frac{H_5 - H_6}{H_5 - H_2} \quad (5.28)$$

A tipikus hőerőművekben a hevítőben 170-180 bar nyomást és 535-570 °C hőmérsékletet alkalmaznak.

A hatásfok értéke a Carnot-féle körfolyamathoz képest kisebb, de a gyakorlatban megvalósítható körfolyamatok közül a legjobban ez közelíti meg.

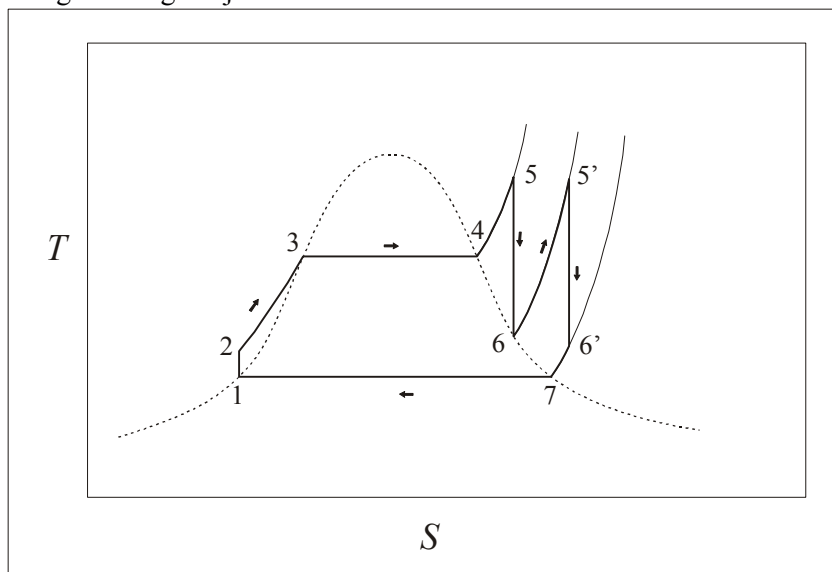
A hatásfok növelésére több megoldást is használnak.

Az egyik megoldás a szuperkritikus körfolyamat megvalósítása (5.22 ábra). Ezzel a rendszerrel a Carnot-féle körfolyamat jobban megközelíthető. A szükséges nyomásértékek azonban nagyon magasak (240-270 bar), s ezzel együtt bonyolultabb szabályozásra és kényszeráramoltatásra is szükség van.



**5.22. ábra:** Szuperkritikus Rankine körfolyamat T-S diagramja

Másik megoldás a gőz újrahevítése.

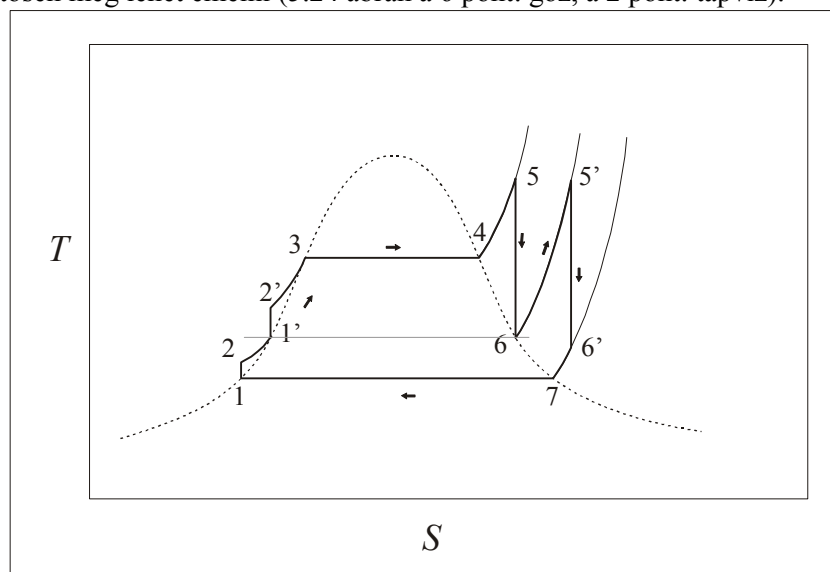


**5.23. ábra:** Újrahevítéses Rankine körfolyamat T-S diagramja

Korszerű erőművekben a turbinát több részből szerelik össze, így lehetőség van fokozatok létrehozására: az első turbinafokozat után (5.23 ábra, 6 pont) a gőzt

visszavezetik a hevítőbe, majd a forrosítás után a második turbinafokozatba (5.23 ábra, 5' pont), s csak ezután juttatják el a kondenzátorba. Így 2-4% hatásfok növekedést lehet elérni.

A hatásfok javítható azzal is, ha a bemenő víz hőmérsékletét sikerül megemelni; ez a regeneratív tápvízmelegítés. A turbinából kivezetett gőzt az azonos nyomású tápvízzel összekeverve, a hevítőbe belépő víz hőmérsékletét jelentősen meg lehet emelni (5.24 ábrán a 6 pont: gőz, a 2 pont: tápvíz).



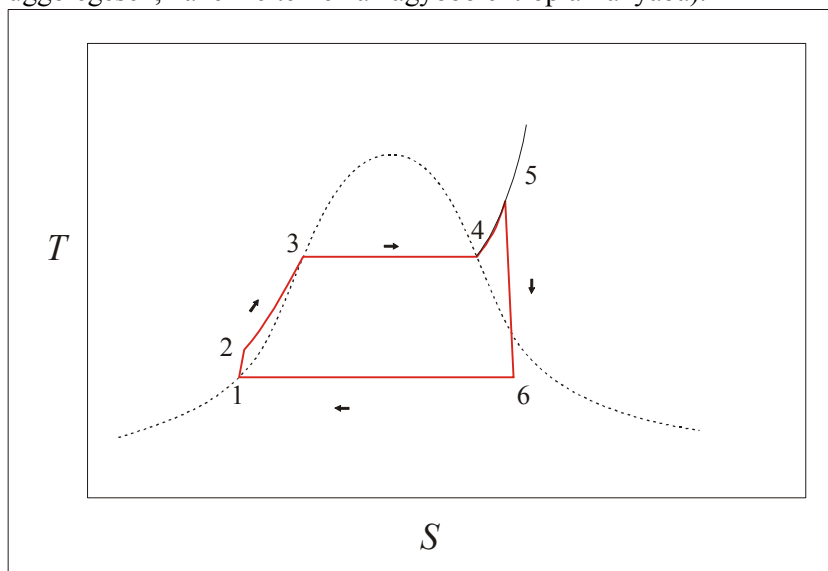
**5.24. ábra:** Rankine körfolyamat regeneratív tápvízmelegítéssel

Ezzel a módszerrel 6-10% hatásfok növekedés érhető el. A mai korszerű erőművek regeneratív tápvízmelegítéssel és a gőz újrahevítésével 38-39%-os hatásfokon tudnak üzemelni.

Ha kisebb hőmérsékletkülönbségeket kell villamos energia előállítására felhasználni, akkor a szerves Rankine körfolyamatot (organic Rankine cycle: ORC) lehet alkalmazni. Ennél a közeg nem víz, hanem valamilyen szerves anyag, leggyakrabban szénhidrogén, például pentán vagy bután. Az ilyen erőművek kis teljesítményűek; alkalmasak ipari hulladékhő, geotermális hő, biomasszából nyerhető hő vagy szoláris hő hasznosítására.

Az 5.20-5.24 ábrák az ideális Rankine körfolyamatokat mutatták be. Természetesen a valódi erőműveknél nem lehet eltekinteni a termikus veszteségektől. Ezek a veszteségek a T-S diagramon legfőképpen az izentrópus

szakaszoknál észrevehetőek (az 5.25 ábrán a körfolyamat 1-2 és 5-6 szakaszai nem függőlegesek, hanem eltérnek a nagyobb entrópia irányába).



**5.25. ábra:** Valódi Rankine-Clausius gőzkörfolyamat T-S diagramja

**Kérdéstár:**

1. Mennyi a jósági tényezője annak a Carnot-féle körfolyamatot alkalmazó fagyasztógépnek, mely a 15 °C-os kamrában áll, és a belsejében –18 °C van?
2. Mennyi lehet elméletileg a hatásfoka annak a benzinmotornak, melynek a kompresszióviszonya 1: 10,5 (Opel Calibra C20XE 2,0i 16V)?
3. A direkt körfolyamatokat megvalósító gépek a/az \_\_\_\_\_.
4. A \_\_\_\_\_ munkavégzés árán a külső környezetből hőt visz a fűtendő belső térbe.
5. A gázturbinás erőművekben a/az \_\_\_\_\_ körfolyamatot valósítják meg.
6. A valódi benzinmotorok hatásfoka
  - a. nagyobb lehet, mint 10%
  - b. kisebb lehet, mint 20%
  - c. nagyobb lehet, mint 30%
  - d. kisebb lehet, mint 40%
  - e. nagyobb lehet, mint 50%
  - f. kisebb lehet, mint 60%
7. A valódi dízelmotorok hatásfoka
  - a. kisebb lehet, mint 10%
  - b. nagyobb lehet, mint 20%
  - c. kisebb lehet, mint 30%
  - d. nagyobb lehet, mint 40%
  - e. kisebb lehet, mint 50%
  - f. nagyobb lehet, mint 60%

8. Az ideális Carnot-féle körfolyamat hatásfoka
  - a. az elméletileg elérhető legnagyobb
  - b. függ az anyagi minőségtől
  - c. függ az entrópiától
  - d. függ a hőtartályok hőmérsékletétől
  - e. nem függ a hideg hőtartály hőmérsékletétől
  - f. nem függ a meleg hőtartály hőmérsékletétől
  
9. Az elméleti Brayton-Joule körfolyamat
  - a. hatásfoka függ az égés hőmérsékletétől
  - b. hatásfoka függ a nyomásviszonytól
  - c. állandó térfogaton játszódik le
  - d. állandó hőmérsékleten játszódik le
  - e. hatásfoka állandó
  
10. Az elméletileg elérhető legmagasabb hatásfokot a legjobban
  - a. az Otto-féle körfolyamat közelíti meg
  - b. a Diesel-féle körfolyamat közelíti meg
  - c. a Brayton-Joule körfolyamat közelíti meg
  - d. a Sabathe/Seiliger-féle körfolyamat közelíti meg
  - e. a Rankine-Clausius körfolyamat közelíti meg
  
11. Direkt körfolyamatnál
  - a. a közeg folyamatosan melegszik
  - b. a közeg folyamatosan hűl
  - c. a közeg hőmérséklete nem változik
  - d. a közeg munkát végez
  - e. a közegen munkát végeznek



12. Indirekt körfolyamatnál
  - a. a közeg folyamatosan melegszik
  - b. a közeg folyamatosan hűl
  - c. a közeg hőmérséklete nem változik
  - d. a közeg munkát végez
  - e. a közegen munkát végeznek
  
13. Carnot-féle körfolyamat során
  - a. nem lehet izotermikus szakasz
  - b. lehet izotermikus szakasz
  - c. lehet izochor szakasz
  - d. lehet izobár szakasz
  - e. nem lehet adiabatikus szakasz
  
14. Rankine-Clausius körfolyamat során
  - a. nem lehet izotermikus szakasz
  - b. lehet izotermikus szakasz
  - c. nem lehet izochor szakasz
  - d. nem lehet izobár szakasz
  - e. nem lehet adiabatikus szakasz
  
15. A Sabathe/Seiliger-féle körfolyamat
  - a. gőzkörfolyamat
  - b. a benzinmotorok elméleti körfolyamata
  - c. a dízelmotorok elméleti körfolyamata
  - d. a valódi motorok közelítő körfolyamata
  - e. gázmotorok közelítő körfolyamata

