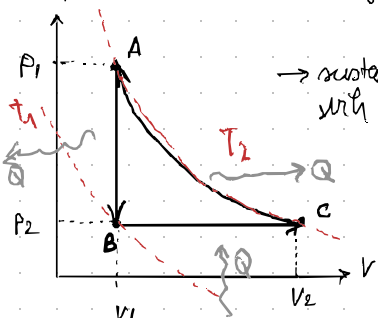


4.2. KRUŽNI PROCESI I DRUGI ZAKON TERMODINAMIKE

→ dosad smo koristili 1. ZTD i računali smo rad koji možemo dobiti pri reverzibilnom procesu
! reverzibilni proces nije nužno kružni

→ zamislimo nas kako je moguće načiniti uređaj koji kontinuirano pretvara toplinsku energiju u mehanički rad



→ sustav se nakon svih procesa vratio u početnu točku A

→ nisu svi reverzibilni procesi znakovite geline!

→ $W \neq 0$, U je funkcija stanja

Zamislimo nas koeficijent iskorištenja dovedene topline: $\eta = \frac{W}{Q_{in}}$

$$W_{AB} = 0 \quad (V_1 = V_2) \quad \Delta Q_{AB} = \Delta U_{AB} < 0 \quad (T_1 < T_2) \quad \Delta U_{AB} = nC_V \int dT$$

$$W_{BC} \neq 0 = P_2 (V_2 - V_1) \quad \Delta Q_{BC} = \underbrace{P_2 \Delta V}_{>0} + \underbrace{\Delta U_{BC}}_{>0} \quad (T_2 > T_1) \quad \Delta Q_{BC} = nC_P \int dT = \Delta U_{BC} + P_2 (V_2 - V_1)$$

$$W_{CA} = nRT_A \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \Delta U = 0 \quad \Delta Q_{CA} = -\Delta W_{CA} \Rightarrow \Delta Q_{CA} = \Delta W_{CA} < 0$$

"Kružnost" procesa:

$$1) \quad \Delta U = 0 = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} \Leftrightarrow \Delta U_{BC} = -\Delta U_{AB}$$

$$C_P - C_V = R \Rightarrow nC_P (T_A - T_B) = \Delta U_{BC} + P_2 (V_2 - V_1) \quad \uparrow + nC_V (T_B - T_A) = \Delta U_{AB}$$

$$\Rightarrow n(T_A - T_B) \left[\underbrace{C_P - C_V}_R \right] = \Delta U_{BC} + \Delta U_{AB} + P_2 (V_2 - V_1) \quad \xrightarrow{\frac{T_A}{V_2} = \frac{T_B}{V_1}} \quad V_1 = \frac{T_B V_2}{T_A}$$

$$nR(T_A - T_B) = \Delta U_{BC} + \Delta U_{AB} + \frac{nRT_A}{V_2} (V_2 - V_1)$$

$$nR(T_A - T_B) = \Delta U_{BC} + \Delta U_{AB} + nR \left(T_A - \frac{T_A V_2}{V_1} \cdot \frac{T_A V_2}{T_A} \right)$$

$$\cancel{nR(T_A - T_B)} = \Delta U_{BC} + \Delta U_{AB} + \cancel{nR(T_A - T_B)}$$

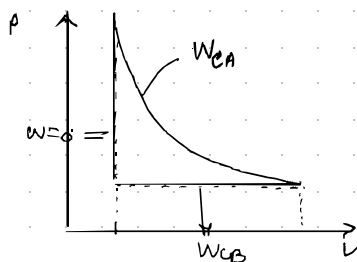
$$0 = \Delta U_{BC} + \Delta U_{AB} \quad \text{OK}$$

2) η - koef. iskorištenja $\rightarrow \frac{W}{Q_{in}}$

$$W = W_{BC} + W_{CA} = P_2 (V_2 - V_1) + \underbrace{nRT_A \ln \frac{V_1}{V_2}}_{<0}$$

$$Q_{in} = \Delta Q_{BC} = P_2 (V_2 - V_1) + nC_V (T_A - T_B)$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}}$$



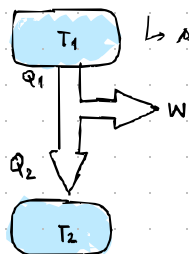
Drugi zakon termodinamike

1. ZTD ne zabranjuje kružne procese oblika



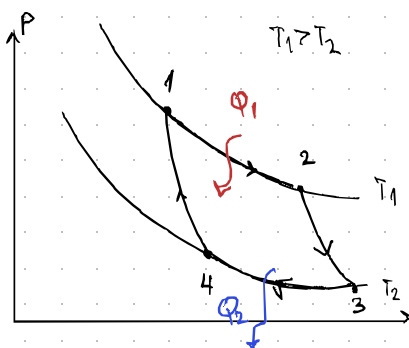
→ nemoguće napraviti toplinski stroj koji bi, ponavljajući kružni proces, sve toplinu uselila iz jednog spremnika pretvorio u rad => **perpetuum mobile druge vrste**

CARNOTOV KRUŽNI PROCES



→ se kojom se sistem nakon dva izoterma i dva adijabatska procesa vraća u ravnotežno stanje

idealna situacija = reverzibilni kružni proces u kojem se ni faza ni odnogi gotovo ravnotežno

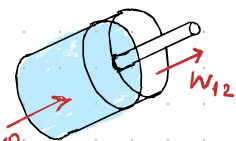


1-2: izotermno širenje

(kontakt s toplim spremnikom)

$$\Delta U_{12} = 0 \rightarrow Q_1 = W_{12} = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

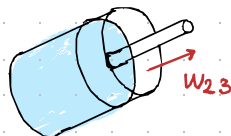
*plin je u kontaktu = sve Q → meh rad W



2-3: adijabatsko širenje

$$\Delta Q_{23} = 0 \rightarrow W_{23} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_1 - T_2) > 0$$

*plin vrši rad na temelju svoje unutarnje E → $-\Delta U_{23} = W_{23}$

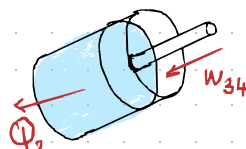


3-4: izotermna kompresija

(kontakt s hladnim spremnikom)

$$\Delta U_{34} = 0 \rightarrow Q_2 = W_{34} = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

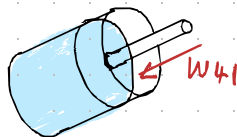
*plin je u kontaktu s hladnim spremnikom kojem predaje toplinu



4-1: adijabatska kompresija

$$\Delta Q_{41} = 0 \rightarrow W_{41} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_2 - T_1) < 0$$

*ulaznim radom se povećava unutarnja energija plina $-\Delta U_{41} = W_{41}$



Koeficijent iskorišćenja:

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

↓
unesena toplina

Ukupni rad:

$$W_{uk} = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$$

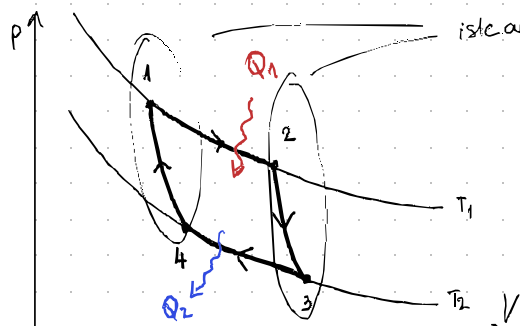
Ukupna toplina:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

⇒ unesena toplina $Q_{in} = Q_1$:

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \quad (Q_2 < 0) \Rightarrow$$

$$\boxed{\eta = \frac{W_{uk}}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}}$$



iste adijabate

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

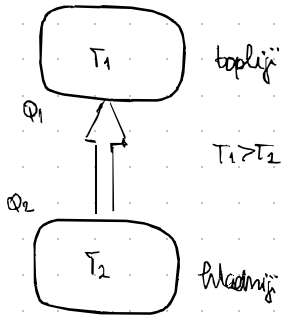
$$\Rightarrow \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1}$$

podijelimo jedno s drugim

unat'

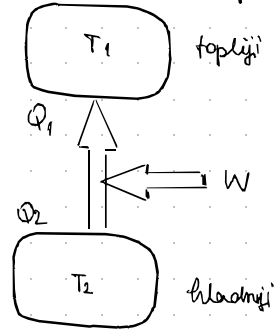
$$\eta = 1 - \frac{(T_2 - T_1) n R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{(T_2 - T_1) n R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

Toplinska crpka i hladnjača

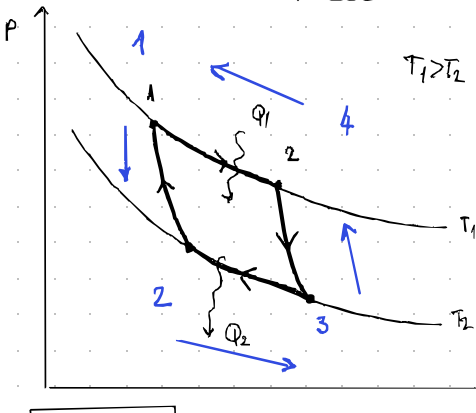


Nemoguće je konstruirati toplinsku crpku koja će u bezuslomnom procesu samo izvlačiti toplinu iz hladnijeg spremnika i predavati je toplijem

Inverzni Carnotov proces



Inverzni Carnotov proces



→ kod toplinske crpke ili hladnjače Q_2 se uzima iz hladnijeg spremnika, a toplina Q_1 se predaje toplijem spremniku

omjer prenesene topline u odnosu na potreban uloženi rad za taj prijenos

$$\epsilon = \frac{Q}{W_{uk}}$$

$$\epsilon_{hladnjače} = \frac{Q_2}{W}$$

$$\epsilon_{crpka} = \frac{Q_1}{W}$$

hladnjača

$$\epsilon_n = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_2}{Q_2 - |Q_1|}$$

crpka

$$\epsilon_c = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_1}{Q_2 - |Q_1|}$$

→ mjerimo učinkovitost u odnosu na primljenu Q_2 → mjerimo koliko hladnjača hladi

→ toplina koja je predana toplijem spremniku preko Q_1

* svi koeficijenti često > 1

* mi smo stvorili energiju (dobili više nego što smo dali) jer smo tu energiju samo PREMIJELI iz hladnijeg spremnika

→ mnogo manji rada je potrebno za "uklapanje"

energiju iz okoline (u ovom slučaju hladniji spremnik) i prenijeti je nego radom stvoriti

$$\epsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1$$

(mpr grijanji)

