

Zbirka nalog iz termodinamike

Umut Hanoglu, Gašper Vuga, Božidar Šarler

Gradivo za vaje pri predmetu Termodinamika

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Laboratorij za dinamiko fluidov in termodinamiko
Ljubljana 2025



Predgovor

Zbirka predstavlja študijsko gradivo za slušatelje avditornih vaj pri predmetu Termodinamika. Zasnovana je za študente prve stopnje v programu Strojništvo - razvojno raziskovalni program.

Osnovni koncepti za reševanje nalog so v dokumentu ŠARLER, Božidar, DOBRAVEC, Tadej. Termodinamika = Thermodynamics. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2025. 1 USB ključ (1 datoteka PDF (1535 str.)) [1].

Namen zbranih nalog je, da študentje dodatno utrdijo in razširijo svoje znanje pridobljeno na avditornih vajah. Nekatere naloge so v celoti rešene, pri nekaterih pa je podan samo končni rezultat. Študente spodbujamo, da nalogo najprej poskusijo rešiti sami ter nato rešitve uporabijo zgolj za preverjanje pravilnosti. Vsekakor je možnih poti do rešitve pri nekaterih nalogah več, vendar je tu za posamezen primer podana samo ena možnost.

Bralcem priporočamo uporabo Krautovega strojniškega priročnika (SP) [2], kjer lahko najdejo podatke o termodinamičnih lastnostih vode in vodne pare. Priporočamo tudi uporabo diagramov za suhi zrak [3] in plin R134a [4-5].

Ljubljana, avgust 2025

Avtorji

Kazalo

Oznake	V
1 Sistemi in procesi.....	1
2 Energija.....	7
3 Termodinamske lastnosti	11
4 Prvi glavni zakon termodinamike.....	15
5 Uvod k drugemu glavnemu zakonu termodinamike.....	20
6 Drugi glavni zakon termodinamike	26
7 Krožni procesi.....	32
8 Hladilni krožni procesi	40
9 Mešanica idealnih plinov	46
10 Vlažni zrak	50
11 Analiza zgorevanja	53
12 Reference.....	57

Oznake

$V \text{ [m}^3\text{]}$	volumen / volume
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	gostota / density
$P \text{ [Pa]}$	tlak / pressure
$T \text{ [K]}$	temperature / temperature
$m \text{ [kg]}$	masa / mass
$g \text{ [m/s}^2\text{]}$	gravitacija / gravity
$F_g \text{ [N]}$	teža / weight
$E \text{ [J]}$	celotna energija / total energy
$e \text{ [J/kg]}$	masno-specifična celotna energija / mass-specific total energy
$U \text{ [J]}$	notranja energija / internal energy
$PE \text{ [J]}$	potencialna energija / potential energy
$KE \text{ [J]}$	kinetična energija / kinetic energy
$z \text{ [m]}$	višina / height
$S \text{ [J/K]}$	entropija / entropy
$H \text{ [J]}$	entalpija / enthalpy
$N \text{ [mol]}$	množina snovi / amount of substance
$v \text{ [m}^3 \text{ / kg]}$	masno-specifični volumen / mass-specific volume
$u \text{ [J/kg]}$	masno-specifična notranja energija / mass-specific internal energy
$s \text{ [J/(K kg)]}$	masno-specifična entropija / mass-specific entropy
$h \text{ [J/kg]}$	masno-specifična entalpija / mass-specific enthalpy
$W \text{ [J]}$	fizikalno delo / physical work
$W_{eng} \text{ [J]}$	inženirsko delo / engineering work
$\dot{W} \text{ [W]}$	moč / power
$\mathbf{j} \text{ [W/m}^2\text{]}$	toplotni tok / heat flux
$\mathbf{j}_{cond} \text{ [W/m}^2\text{]}$	prevodnostni toplotni tok / conduction heat flux
$\mathbf{j}_{conv} \text{ [W/m}^2\text{]}$	konvektivni toplotni tok / convection heat flux
$\mathbf{j}_{rad} \text{ [W/m}^2\text{]}$	sevalni toplotni tok / radiation heat flux
$C_v \text{ [J/K]}$	specifična toplota pri konstantnem volumnu / specific heat at constant volume
$c_v \text{ [J/(kg K)]}$	masno-specifična toplota pri konstantnem volumnu / mass-specific heat at constant volume

C_p [J/K]	specifična toplota pri konstantnem tlaku / specific heat at constant pressure
c_p [J/(kg K)]	masno-specifična toplota pri konstantnem tlaku / mass-specific heat at constant pressure
κ [-]	razmerje specifičnih toplot / specific heat ratio
k [W/(m K)]	kinetična energija / kinetic energy
λ [W/(m ² K)]	toplotna prevodnost / thermal conductivity
ε [-]	emisivnost / emisivity
$\bar{k}$ [kN/m]	vzmetna konstanta / spring constant
d [m]	premer / diameter
L [m]	dolgžina objecta / length of an object
α [K ⁻¹]	koeficient termičnega volumskega razteka / thermal volume expansion coefficient
$\dot{m}$ [kg/s]	masni tok / mass flow
A [m ²]	ploščina / surface area
v [m/s]	hitrost / velocity
W_{net} [J]	celotno delo / total work
Q_{net} [J]	celotna prenešena toplota / total heat transfer
Q_{in} [J]	celotna vnešena toplota / total heat transfer input
Q_{do} [J]	dovajana toplota / added heat
Q_{od} [J]	odvajana toplota / removed heat
η [-]	termični izkoristek / thermal efficiency
η_{max} [-]	največji termični izkoristek / maximal thermal efficiency
η' [-]	termični izkoristek za hladilnik / thermal efficiency for refrigerator
η'_{max} [-]	največji termični izkoristek za hladilnik / maximal thermal efficiency for refrigerator
η'' [-]	termični izkoristek za toplotno črpalko / thermal efficiency for heat pump
η''_{max} [-]	največji termični izkoristek za toplotno črpalko / maximal thermal efficiency for heat pump
Q_H [J]	prenešena toplota pri najvišji temperaturi / heat transfer at the highest temperature
Q_C [J]	prenešena toplota pri najnižji temperaturi / heat transfer at the lowest temperature
$Q_{i \rightarrow j}$ [J]	prenešena toplota med prehodom iz stanja i v stanje j / heat transfer at transition from state i to state j
$W_{i \rightarrow j}$ [J]	opravljeno delo med prehodom iz stanja i v stanje j / work done at transition from state i to state j
s_i [J/(kg K)]	specifična entropija v stanju i / specific entropy in state i
T_C [K]	najnižja temperatura v krožnem procesu / the lowest temperature in the cycle
T_H [K]	najvišja temperatura v krožnem procesu / the highest temperature in the cycle
$\dot{W}_p$ [W]	moč črpalke / pump power

$\dot{W}_t$ [W]	moč turbine / turbine power
$\dot{Q}_{sg}$ [W]	hitrost prenosa toplote v kotlu / steam generator's rate of heat transfer
$\dot{Q}_c$ [W]	hitrost prenosa toplote v kondenzatorju / condensator's rate of heat transfer
h_i [J/kg]	specifična entalpija v stanju i / specific enthalpy in state i
$\dot{m}$ [kg/s]	masni pretok / mass flow rate
v_i [m ³ /kg]	specifični volumen v stanju i / specific volume in state i
v' [m ³ /kg]	specifični volumen v tekoči fazi / specific volume in liquid phase
v'' [m ³ /kg]	specifični volumen v plinski fazi / specific volume in gas phase
t [s]	čas / time
p_i [Pa]	tlak v stanju i / pressure in state i
$\bar{x}_i$ [–]	suhost pare v stanju i / vapor quality in the state i
$\dot{Q}_{comb}$ [W]	hitrost dovajanja toplote pri izgorevanju / combustor heat input rate
η_c [–]	izentropna učinkovitost kompresorja / isentropic efficiency of compressor
η_p [–]	izentropna učinkovitost črpalke / isentropic efficiency of pump
η_t [–]	izentropna učinkovitost turbine / isentropic efficiency of turbine
i [–]	stanje i / state i
u_i [J/kg]	specifična notranja energija v stanju i / specific internal energy in state i
r [–]	kompresijsko razmerje / compression ratio
R [J/(kg K)]	specifična plinska konstanta / specific gas constant
$\underline{R}_0$ [J/(kmol K)]	univerzalna plinska konstanta / universal gas constant
M [kg/kmol]	molska masa / molar mass
$\dot{Q}_{cond}$ [W]	hitrost prenosa toplote v kondenzatorju / heat transfer rate in the condenser
$\dot{Q}_e$ [W]	hitrost prenosa toplote v uparjalniku / heat transfer rate in the evaporator
$\dot{Q}_{tv}$ [W]	hitrost prenosa toplote v dušilnem ventilu / heat transfer rate in the throttling valve
$\dot{Q}_{comp}$ [W]	hitrost prenosa toplote v kompresorju / heat transfer rate in the compressor
$\dot{Q}_{comp}$ [W]	Hitrost prenosa toplote v gorilniku
$\dot{W}_{comp}$ [W]	moč kompresorja / power of compressor
$\dot{W}_{tv}$ [W]	moč dušilnega ventila / power of throttling valve
$\dot{W}_e$ [W]	moč evaporatorja / power of evaporator
$\dot{W}_{cond}$ [W]	moč kondenzatorja / power of condenser
$\dot{W}_{tur}$ [W]	moč turbina / power of turbine

$\dot{Q}_{HHX}$ [W]	hitrost prenosa toplote v toplem prenosniku toplote / heat transfer rate in the hot heat exchanger
$\dot{Q}_{CHX}$ [W]	hitrost prenosa toplote v hladnem prenosniku toplote / heat transfer rate in the cold heat exchanger
m_k [kg]	masa komponente k / mass of the component k
M_k [kg/mol]	molekulska masa komponente k / molecular mass of the component k
N_k [mol]	število molov komponente k / number of moles of the component k
N [mol]	celotno število molov mešanice / total number of the moles of the mixture
X_{mk} [-]	masni delež komponente k / mass fraction of the component k
X_{Nk} [-]	molski delež komponente k / mole fraction of the component k
M [kg/mol]	molekulska masa mešanice / molecular mass of the mixture
X_{vg} [-]	masno razmerje (absolutna vlažnost, vlažnostno razmerje) / mass ratio (absolute humidity, humidity ratio)
ϕ [-]	relativna vlažnost / relative humidity
m_v [kg]	masa vodne pare pri temperaturi T / mass of water vapor at temperature T
m_g [kg]	masa suhega zraka / mass of dry air
P_v [Pa]	tlak vodne pare / water vapor pressure
P_{sat} [Pa]	tlak nasičenja vodne pare pri dani temperaturi / saturation pressure at given temperature
T_{dp} [K]	rosišče / dew point
AF [-]	razmerje med zrakom in gorivom na podlagi mase (za kapljevita in trdna goriva) / air-fuel ratio based on mass (for liquid and solid fuels)
$\underline{AF}$ [-]	razmerje med zrakom in gorivom na podlagi števila molov (za kapljevita in trdna goriva) / air-fuel ratio based on number of moles (for liquid and solid fuels)
Φ [-]	ekvivalenčno razmerje / equivalence ratio
$\dot{H}_R$ [W]	hitrost entropije reaktantov / rate of entropy of reactants
$\dot{H}_P$ [W]	hitrost entropije produktov / rate of entropy of products
$\dot{N}_i$ [mol/s]	molski pretok sestavine i / mole flow rate species i
$\underline{h}_{f,i}^0$ [J/mol]	entalpija formacije sestavine i / enthalpy of formation of species i
$\underline{h}_{i,T}$ [J/mol]	entalpija spojine pri poljubnih pogojih P, T / enthalpy of compound at arbitrary conditions P, T

1 Sistemi in procesi

V tem poglavju so predstavljeni osnovni koncepti termodinamike. Za lažje razumevanje, bomo najprej definirali termodinamski sistem. Osredotočili se bomo le na dogajanje znotraj sistema in njegove interakcije z okolico prek njegovih meja. Za začetek bomo sisteme najprej razdelili na podlagi njihovih interakcij z okolico.

- **Zaprt sistem:** Energija lahko, masa pa ne more prestopiti meje sistema.
- **Odprt sistem:** Energija in masa lahko prečkata meje sistema.
- **Izoliran sistem:** Niti masa niti energija ne moreta prečkati meje sistema.

Termično raztezanje

Poleg termodinamskih sistemov v tem poglavju obravnavamo še termično raztezanje. Spremembo dolžine enosnega elementa zaradi konstantne spremembe temperature definiramo kot

$$\Delta l = l_1 \alpha_L (T_2 - T_1),$$

kjer indeks 2 predstavlja končno, 1 pa začetno stanje, α_L pa linearni razteznostni koeficient. Volumski raztezek trdnine lahko definiramo kar kot

$$\Delta V = V_1 3\alpha_L (T_2 - T_1),$$

za primer kapljevine pa kot

$$\Delta V = V_1 \alpha (T_2 - T_1),$$

kjer je α volumski razteznostni koeficient.

Naloge

1.1 Za naslednje sisteme določite, ali je opisani sistem najbolje modelirati kot izoliran, zaprt ali odprt sistem:

- a) para, ki teče skozi turbino (*odprt sistem*)
- b) žarnica z žarilno nitko (*zaprt sistem*)
- c) črpalka za gorivo v premikajočem se avtomobilu (*odprt sistem*)
- d) sidro potopljene ladje, ki leži 3000 m pod gladino oceana (*izoliran sistem*)
- e) streha hiše (*zaprt sistem*)

1.2 Za naslednje sisteme določite, ali je opisani sistem najbolje modelirati kot izoliran, zaprt ali odprt sistem:

- a) napolnjena pnevmatika (*zaprt sistem*)
- b) vrtni razpršilnik med delovanjem (*odprt sistem*)
- c) skodelica, napolnjena s kapljevito vodo (*zaprt sistem z izjemo izhlapevanja*)
- d) hladilnik motorja (*odprt sistem*)
- e) kamnita formacija 200 m pod površjem Zemlje (*izoliran sistem*)

1.3 Za naslednje sisteme določite, ali je opisani sistem najbolje modelirati kot izoliran, zaprt ali odprt sistem:

- a) črpalka, ki dovaja vodo v stavbo (*odprt sistem*)
- b) čajnik z vrelo vodo (*odprt sistem*)
- c) aktiven vulkan (*odprt sistem*)
- d) trdna zlata palica, postavljena v zelo dobro izolirano škatlo (*izoliran sistem*)
- e) stol (*zaprt sistem*)

1.4 Za naslednje sisteme določite, ali je opisani sistem najbolje modelirati kot izoliran, zaprt ali odprt sistem:

- a) škripec dvigala (*zaprt sistem*)
- b) kopalna kad (*zaprt sistem*)
- c) človek (*odprt sistem*)
- d) kovinski kos, ki se oblikuje na stružnici (*odprt sistem*)
- e) komet, ki kroži okoli Sonca v Oortovem oblaku (oblaku neaktivnih kometov, ki se nahaja daleč onkraj orbit planetov) (*izoliran sistem*)

1.5 Narišite shemo avtocestnega mosta čez reko. Poiščite mehanizme prehajanja mase in energije iz in v sistem.

Potencialni mehanizmi:

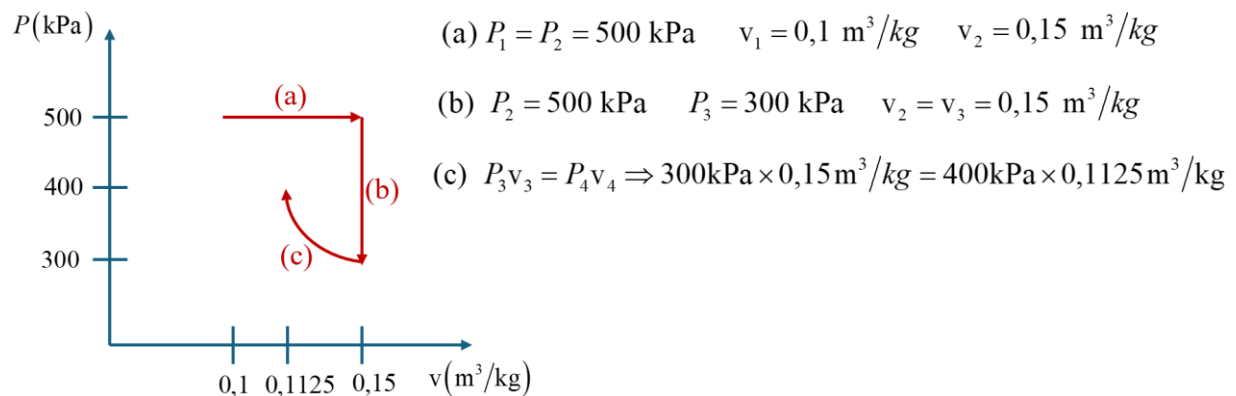
prehajanje mase: deli mostu odpadajo

prehajanje energije:

- ogrevanje zaradi trenja pnevmatik vozil
- ogrevanje zaradi sonca
- hlajenje zaradi vetra, ki obteka most
- ...

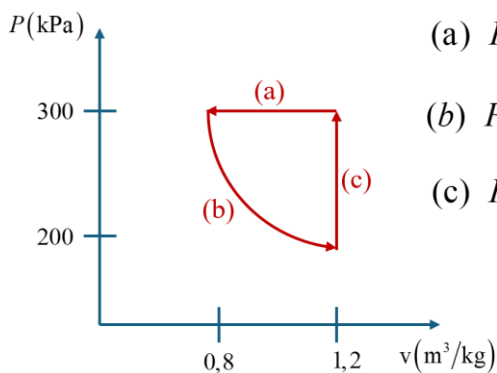
1.6 V P - v diagramu narišite naslednje tri zaporedne preobrazbe:

- izobarno ekspanzijo iz začetnega stanja 500 kPa in $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ do končnega stanja, kjer je specifični volumen $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$,
- dekompresijo pri konstantnem specifičnem volumnu do tlaka 300 kPa,
- in proces pri katerem je $Pv = \text{konst.}$ do končnega tlaka 400 kPa.



1.7 Termodinamični cikel, sestavljen iz treh procesov, narišite v P - v diagramu.

- Izobarna kompresija iz 300 kPa in $1,20 \text{ m}^3/\text{kg}$ do specifičnega volumna $0,80 \text{ m}^3/\text{kg}$.
- Proces, kjer je $Pv = \text{konst.}$ do specifičnega volumna $1,20 \text{ m}^3/\text{kg}$.
- Izohorni proces do tlaka 300 kPa.



$$(a) \quad P_1 = P_2 = 300 \text{ kPa} \quad v_1 = 1,2 \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_2 = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$(b) \quad P_2 v_2 = P_3 v_3 \Rightarrow 300 \text{ kPa} \times 0,8 \text{ m}^3/\text{kg} = 200 \text{ kPa} \times 1,2 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$(c) \quad P_4 = 300 \text{ kPa} \quad v_3 = v_4 = 1,2 \text{ m}^3/\text{kg}$$

1.8 Imejmo 10 kg zraka pri temperaturi 50°C in volumnu 5 m^3 , ki izobarno ekspandira do volumna 10 m^3 . Nato zrak ohladimo pri konstantnem volumnu, pri čemer pade tlak na polovico začetnega. Za tem zrak komprimiramo pri konstantni temperaturi do volumna 7 m^3 . Določi veličine stanja (T , V , P) v vseh ravnovesnih točkah procesa. Proces tudi skicirajte v P - v diagramu.

1. točka procesa: $T = 50^\circ\text{C}$, $V = 5 \text{ m}^3$, $P = 1,85 \text{ bar}$

2. točka procesa: $T = 100^\circ\text{C}$, $V = 10 \text{ m}^3$, $P = 1,85 \text{ bar}$

3. točka procesa: $T = 50^\circ\text{C}$, $V = 10 \text{ m}^3$, $P = 0,925 \text{ bar}$

4. točka procesa: $T = 50^\circ\text{C}$, $V = 7 \text{ m}^3$, $P = 1,32 \text{ bar}$

1.9 Določite specifični volumen trdne kocke neznane sestave, dimenzij $0,5 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$. Teža kocke pri nadmorski višini 0 m , kjer je gravitacijski pospešek $9,81 \text{ m/s}^2$, je 45 N .

$$D = 0,5 \text{ m} \quad \check{S} = 0,25 \text{ m} \quad V = 0,1 \text{ m} \quad F_g = 45 \text{ N} \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$v = ?$$

$$\left. \begin{array}{l} D: 0,5 \text{ m} \\ \check{S}: 0,25 \text{ m} \\ V: 0,1 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow V = 0,5 \times 0,25 \times 0,1 = 0,0125 \text{ m}^3$$

$$m = \frac{F_g}{g} = \frac{45 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 4,587 \text{ kg}$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0,0125 \text{ m}^3}{4,587 \text{ kg}} = 0,00273 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,00273 \text{ m}^3/\text{kg}} = 367 \text{ kg/m}^3$$

1.10 V napravi z valjem in batom je zrak. Premer valja je 12 cm, masa bata 5 kg in gravitacijski pospešek $9,81 \text{ m/s}^2$. Tlak okolice je 100,5 kPa. Kolikšna je masa uteži, s katero dodatno obremenimo bat, da v valju dosežemo 250 kPa absolutnega tlaka.

$$P = 250 \text{ kPa} \quad P_{atm} = 100,5 \text{ kPa} \quad d = 0,12 \text{ m} \quad m = 5 \text{ kg} \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

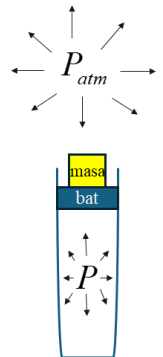
$$m = ?$$

$$P = P_b + P_g + P_{atm}$$

$$P_g = \frac{F_g}{A} = \frac{mg}{\pi d^2/4} = \frac{5 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{3,14 \times 0,12^2 \text{ m}^2/4} = 4,333 \text{ Pa}$$

$$P_g = P - P_b - P_{atm} \Rightarrow 250 \text{ kPa} - 4,333 \text{ kPa} - 100,5 \text{ kPa} = 145,167 \text{ kPa}$$

$$m = \frac{P_g A}{g} = \frac{145,167 \text{ Pa} \times 3,14 \times 0,12^2 \text{ m}^2/4}{9,81 \text{ m/s}^2} = 168 \text{ kg}$$



1.11 Železniški tir ima pri temperaturi 0°C dolžino 9 m. Linearni razteznostni koeficient je $1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ (glej SP).

a) Kolikšna je njegova dolžina pri 50°C ?

b) Kolikšen je skupni raztezek na 100 m?

$$l_1 = 9 \text{ m} \quad \alpha = 1,2 \times 10^{-5}$$

$$l_2 = ? \quad \Delta l(l_1 = 100 \text{ m}) = ?$$

$$l_2 = 9005,4 \text{ mm}$$

$$\Delta l(l_1 = 100 \text{ m}) = 60 \text{ mm}$$

1.12 Jekleno kroglo, ki ima premer 10 cm, segrejemo za 300°C . Kolikšen volumen zavzema v segretem stanju? Za koliko se pri tem poveča polmer?

$$d = 10 \text{ cm} \quad \Delta T = 300^\circ\text{C}$$

$$V_2 = ? \quad \Delta r = ?$$

$$V_2 = 529,253 \text{ cm}^3$$

$$\Delta r = 0,179 \text{ mm}$$

1.13 Bencin se v cisterni od začetnega volumna 42000 l in $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zaradi sončevega sevanja segreje na $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kakšen naj bo minimalni preostali volumen v cisterni za kompenzacijo raztezka?

$$V_1 = 42000\text{ l} \quad T_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta V = ?$$

$$\Delta V = 2,7\text{ m}^3$$

1.15 Cisterna prostornine 42000 litrov je v 90 % napolnjena z bencinom temperature $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V preostalem prostoru je suh zrak z isto temperaturo kot bencin. Cisterna ima na vrhu pokrov z oddušnikom, ki zagotavlja prost pretok zraka iz cisterne ter enakost tlaka zraka v cisterni s tlakom okolice $P_{ok} = 1\text{ bar}$. S časom se zaradi sončevega sevanja temperatura v cisterni poveča na $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bencin in zrak). Določi za koliko se pri tem poveča volumen bencina. Določi koliko kg zraka ostane v cisterni po segrevanju. Volumski razteznostni koeficient za bencin najdete v SP.

$$V_1 = 42000\text{ l} \quad T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_2 = 45\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_{ok} = 1\text{ bar}$$

$$\Delta V_{\text{bencin}} = ? \quad m_{\text{zraka}} = ?$$

$$\Delta V_{\text{bencin}} = 2041\text{ l}$$

$$m_{\text{zraka}} = 2,365\text{ kg}$$

1.16 Cisterna prostornine 32000 litrov je v 90 % napolnjena z bencinom temperature $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V preostalem prostoru je suh zrak z isto temperaturo kot bencin. Cisterna ima na vrhu pokrov z oddušnikom, ki zagotavlja prost pretok zraka iz cisterne ter enakost tlaka zraka v cisterni s tlakom okolice $P_{ok} = 1\text{ bar}$. S časom se zaradi sončevega sevanja temperatura v cisterni poveča na $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bencin in zrak). Določi za koliko se pri tem poveča volumen bencina. Določi koliko kg zraka izteče iz cisterne po segrevanju.

$$V_1 = 32000\text{ l} \quad T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_2 = 45\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_{ok} = 1\text{ bar}$$

$$\Delta V_{\text{bencin}} = ? \quad m_{\text{zraka}} = ?$$

$$\Delta V_{\text{bencin}} = 1555\text{ l}$$

$$m_{\text{zraka}} = 2,2817\text{ kg}$$

2 Energija

V tem poglavju se bomo osredotočili na energijo sistema in njeno izmenjavo z okolico. Sistem ima lahko notranjo energijo (U), kinetično energijo (KE) in potencialno energijo (PE). Izmenjava energije je možna skozi meje sistema kot prenos toplote in mase, če je sistem odprt in ni izoliran. Prenos toplote je možen na tri načine, in sicer: s prevodom, konvekcijo in sevanjem. Drug način prenosa energije za sistem je delo (W). Delo je lahko delo na premični meji (kompresija ali ekspanzija), vzmetno delo, električno delo itd.

Naloge

2.1 Para teče skozi cev, ki se nahaja 4 m nad tlemi. Hitrost pare v cevi je 80,0 m/s. Če je specifična notranja energija pare 2765 kJ/kg, določite skupno notranjo energijo, kinetično energijo in potencialno energijo 1,50 kg pare v cevi.

$$v = 80 \text{ m/s} \quad u = 2765 \text{ kJ/kg} \quad m = 1,5 \text{ kg} \quad z = 4 \text{ m}$$

$$U = ?$$

$$KE = ?$$

$$PE = ?$$

$$U = mu = 1,5 \text{ kg} \times 2765 \text{ kJ/kg} = 4,15 \text{ MJ}$$

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = 0,5 \times 1,5 \text{ kg} \times (80 \text{ m/s})^2 = 4,8 \text{ kJ}$$

$$PE = mgz = 1,5 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 4 \text{ m} = 58,9 \text{ J}$$

2.2 Določite specifično energijo zraka pri 25 °C, ki potuje s hitrostjo 35,0 m/s na višini 10,0 m. Upoštevajte, da je specifična notranja energija zraka 212,6 kJ/kg.

$$T = 25 \text{ °C} \quad v = 35 \text{ m/s} \quad z = 10 \text{ m} \quad u = 212,6 \text{ kJ/kg}$$

$$e = ?$$

$$E = U + KE + PE$$

$$e = u + \frac{KE}{m} + \frac{PE}{m} = u + \frac{1}{2}v^2 + gz$$

$$e = 212,6 \text{ kJ/kg} + 0,5 \times (35 \text{ m/s})^2 + 9,81 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ m} = 213,3 \text{ kJ/kg}$$

2.3 Da bi zmanjšali toplotne izgube skozi stekleno okno, razmišljate o zamenjavi okna z eno od treh alternativ: pločevino iz kositra debeline 0,50 cm, plastjo opeke debeline 8,0 cm in kombinacijo lesa in izolacije debeline 4,0 cm. Prvotna debelina stekla je 1,0 cm. Toplotne prevodnosti posameznih materialov so: za steklo 1,40 W/mK, za kositer 66,6 W/mK, za opeko 1,20 W/mK, za kombinacijo lesa in izolacije 0,09 W/mK. Ob upoštevanju notranje temperature površine 20,0 °C in zunanje temperature -5,0 °C določite gostoto toplotnega toka za steklo in tri alternative ter razpravljajte o relativnih prednostih treh alternativ (brez upoštevanja stroškov materiala in namestitve).

$\Delta x_s = 0,01 \text{ m}$	$\Delta x_k = 0,005 \text{ m}$	$\Delta x_o = 0,08 \text{ m}$	$\Delta x_{li} = 0,04 \text{ m}$	$T_n = 20 \text{ °C}$
$k_s = 1,4 \text{ W/mK}$	$k_k = 66,6 \text{ W/mK}$	$k_o = 1,2 \text{ W/mK}$	$k_{li} = 0,09 \text{ W/mK}$	$T_z = -5 \text{ °C}$

$$j_{cond} = ?$$

Za steklo:

$$j_{cond} = \frac{\dot{Q}_s}{A} = -k_s \frac{dT}{dx} = -k_s \frac{\Delta T}{\Delta x_s} = -k_s \frac{T_n - T_z}{\Delta x_s} = -1,4 \frac{293,15 - 268,15}{0,01} = -3,5 \text{ kW/m}^2$$

Za kositer:

$$j_{cond} = \frac{\dot{Q}_k}{A} = -k_k \frac{dT}{dx} = -k_k \frac{\Delta T}{\Delta x_k} = -k_k \frac{T_n - T_z}{\Delta x_k} = -66,6 \frac{293,15 - 268,15}{0,005} = -333 \text{ kW/m}^2$$

Za opeko:

$$j_{cond} = \frac{\dot{Q}_o}{A} = -k_o \frac{dT}{dx} = -k_o \frac{\Delta T}{\Delta x_o} = -k_o \frac{T_n - T_z}{\Delta x_o} = -1,2 \frac{293,15 - 268,15}{0,08} = -375 \text{ W/m}^2$$

Za les/izolacijo:

$$j_{cond} = \frac{\dot{Q}_{li}}{A} = -k_{li} \frac{dT}{dx} = -k_{li} \frac{\Delta T}{\Delta x_{li}} = -k_{li} \frac{T_n - T_z}{\Delta x_{li}} = -0,09 \frac{293,15 - 268,15}{0,04} = -56,25 \text{ W/m}^2$$

2.4 Električni grelnik ima kovinsko tuljavo s temperaturo 250 °C in se uporablja za ogrevanje prostora, kjer je temperatura zraka 15 °C. Če je površina grelnika 0,02 m² in emisivnost grelnega elementa 0,95, določite sevalni toplotni tok med grelnikom in zrakom.

$T_g = 250 \text{ °C}$	$T_z = 15 \text{ °C}$	$A = 0,02 \text{ m}^2$	$\varepsilon = 0,95$	$\dot{Q}_{sev} = ?$
------------------------	-----------------------	------------------------	----------------------	---------------------

$$\dot{Q}_{sev} = -\varepsilon \sigma A (T_g^4 - T_z^4) = -0,95 \times (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4) \times 0,02 \text{ m}^2 \times [(523,15 \text{ K})^4 - (288,15 \text{ K})^4]$$

$$\dot{Q}_{sev} = -73,3 \text{ W}$$

2.5 Dolga cilindrična palica s premerom 3,0 cm je lebdi v zraku. Palico grejemo z električnim tokom, tako da je površinska temperatura enaka 200 °C. Temperatura zraka je 21 °C. Zrak obteka palico s toplotno prestopnostjo 5,0 W/m²K. Emisivnost palice je 0,92. Učinke na koncih palice zanemarimo. Določite linijsko gostoto toplotnega toka (a) zaradi prestopa toplote in (b) zaradi radiacije.

$$T_r = 200 \text{ }^{\circ}\text{C} = 473,15 \text{ K} \quad T_z = 21 \text{ }^{\circ}\text{C} = 294,15 \text{ K} \quad \varepsilon = 0,92 \quad \lambda = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\dot{Q} = ? \quad \dot{Q}_{rad} = ?$$

$$j_{conv} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda(T_r - T_z) \Rightarrow \dot{Q} = -\lambda A(T_r - T_z) \quad A = \pi dL \Rightarrow \dot{Q} = -\lambda \pi dL(T_r - T_z)$$

$$\frac{\dot{Q}}{L} = -\lambda \pi d(T_r - T_z) = 5 \text{ W/m}^2\text{K} \times 3,14 \times 0,03 \times (473,15 \text{ K} - 294,15 \text{ K}) = -84,3 \text{ W/m}$$

$$\dot{Q}_{rad} = -\varepsilon \sigma A(T_r^4 - T_z^4) \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{rad}}{L} = -\varepsilon \sigma \pi d(T_r^4 - T_z^4) = 0,92 \times 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^4\text{K}^4 \left((473,15 \text{ K})^4 - (294,15 \text{ K})^4 \right)$$

$$\frac{\dot{Q}_{rad}}{L} = -209 \text{ W/m}$$

2.6 Na voljo imate paro za dodajanje energije sistemu prek masnega pretoka. Entalpija pare znaša 2750 kJ/kg, hitrost pare pa 120 m/s. Potencialna energija pare je zanemarljiva. Če morate v sistem dodati 33,1 MW energije s to paro, določite masni pretok pare na vstopu v sistem.

$$h = 2750 \text{ kJ/kg} \quad v = 120 \text{ m/s}^2 \quad \dot{E} = 33,1 \text{ MW}$$

$$\dot{m} = ?$$

$$E = mh + \frac{1}{2}mv^2 + mgz \Rightarrow \dot{E} = \dot{m}h + \frac{1}{2}\dot{m}v^2 + \dot{m}gz$$

$$\dot{E}_{mt} = \dot{m} \left(h + \frac{1}{2}v^2 \right) \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{E}_{mt}}{h + \frac{1}{2}v^2} = \frac{33,1 \times 10^6 \text{ W}}{2,75 \times 10^6 \text{ J/kg} + 0,5 \times (120 \text{ m/s})^2} = 12 \text{ kg/s}$$

2.7 Na bat v pripravi bat-valj deluje tlak 250 kPa. Ta tlak povzroči premik bata za 0,025 m. Premer bata je 0,20 m. Določite delo bata na plin znotraj valja.

$$P = 250 \text{ kPa} \quad d = 0,2 \text{ m} \quad \Delta x = -0,025 \text{ m}$$

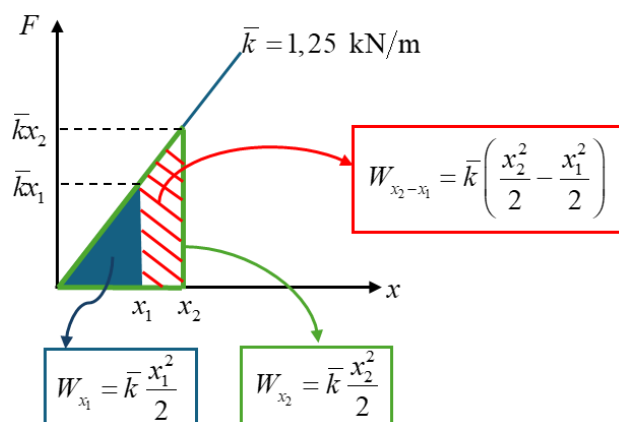
$$W = ?$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV = P \Delta V$$

$$W = P \Delta x \pi d^2 / 4 = 250 \times 10^3 \text{ Pa} \times (-0,025) \times 3,14 \times (0,2)^2 / 4 = -196 \text{ J}$$

2.8 Linearna elastična vzmet z vzmetno konstanto 1,25 kN/m je na začetku dolga 0,25 m. Vzmet se raztegne in opravi 40 J dela. Kolikšna je končna dolžina vzmeti?

$\bar{k} = 1,25 \text{ kN/m}$	$x_1 = 0,25 \text{ m}$	$W_{vz} = 40 \text{ J}$	$x_2 = ?$
-------------------------------	------------------------	-------------------------	-----------



$$W_{vz} = \int_{x_1}^{x_2} F dx = k \int_{x_1}^{x_2} x dx = \bar{k} \left(\frac{x_2^2}{2} - \frac{x_1^2}{2} \right)$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{2W_{vz}}{\bar{k}} + x_1^2} = \sqrt{\frac{2 \times 40 \text{ J}}{1,25 \times 10^3 \text{ N/m}} + (0,25 \text{ m})^2} = 0,356 \text{ m}$$

3 Termodinamske lastnosti

Razumevanje termodinamskega sistema zahteva razumevanje stanja snovi v njem. Snov je lahko v različnih agregatnih stanjih pri različnih pogojih. Da bi lažje razumeli/pričakovali te spremembe, bomo za vsako snov uporabili fazni diagram kot je prikazan spodaj.

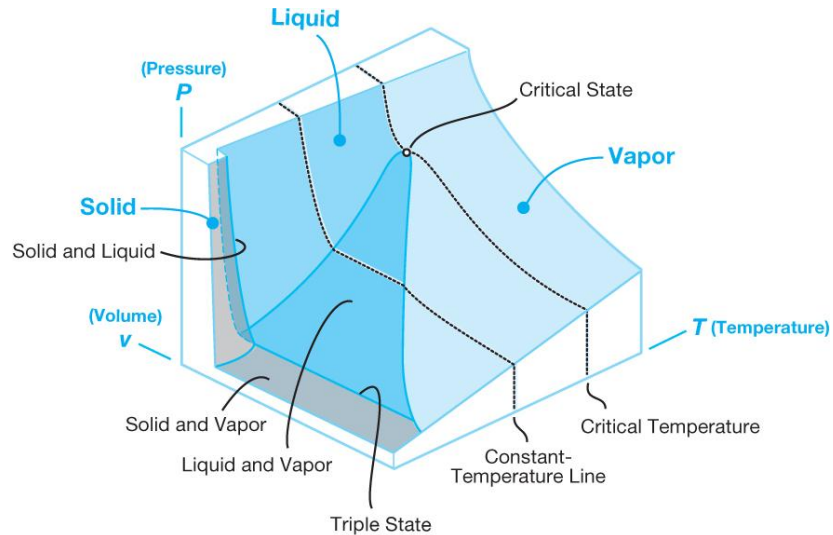


Diagram P - v - T za snovi, katerih volumen se poveča pri prehodu v trdno fazo [3] (str. 70).

Fazni diagrami so v splošnem ploskve v trirazsežnem (ali večrazsežnem) prostoru, vendar jih je mogoče projicirati tudi v dvodimenzionalni prostor.

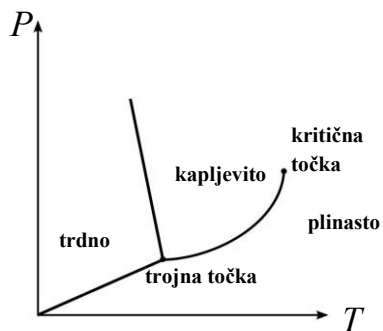
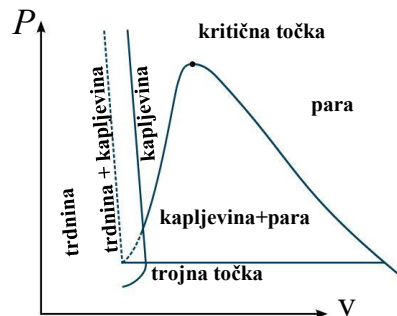


diagram P - T za vodo



P - v diagram za vodo

Naloge

3.1 Specifični volumen vode v kritični točki je $0,00317 \text{ m}^3/\text{kg}$. Le to ohlajamo pri konstantnem specifičnem volumnu. Glede na podatke v tabeli (SP) določite suhost vode, ko temperatura pade na 340°C , 300°C , 200°C in 100°C .

$T [^\circ\text{C}]$	$v' [\text{m}^3/\text{kg}]$	$v'' [\text{m}^3/\text{kg}]$
340	0,001639	0,01078
300	0,001404	0,02165
200	0,001157	0,1272
100	0,001044	1,673

$$v = 0,003155 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \bar{x} = (v - v') / (v'' - v')$$

$$\bar{x} = ?$$

$$T = 340^\circ\text{C}, \quad \bar{x} = \frac{(0,00317 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001639 \text{ m}^3/\text{kg})}{(0,01078 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001639 \text{ m}^3/\text{kg})} = 0.167$$

$$T = 300^\circ\text{C}, \quad \bar{x} = \frac{(0,00317 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001404 \text{ m}^3/\text{kg})}{(0,02165 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001404 \text{ m}^3/\text{kg})} = 0.087$$

$$T = 200^\circ\text{C}, \quad \bar{x} = \frac{(0,00317 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001157 \text{ m}^3/\text{kg})}{(0,1272 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001157 \text{ m}^3/\text{kg})} = 0.016$$

$$T = 100^\circ\text{C}, \quad \bar{x} = \frac{(0,00317 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001044 \text{ m}^3/\text{kg})}{(1,673 \text{ m}^3/\text{kg} - 0,001044 \text{ m}^3/\text{kg})} = 0.0013$$

3.2 Plinasti dušik z maso $1,5 \text{ kg}$ ima tlak 690 kPa in temperaturo 390 K . Določite volumen, ki ga zaseda plinasti dušik ob predpostavki idealnega plina.

$$m = 1,5 \text{ kg} \quad P = 690 \text{ kPa} \quad T = 390 \text{ K}$$

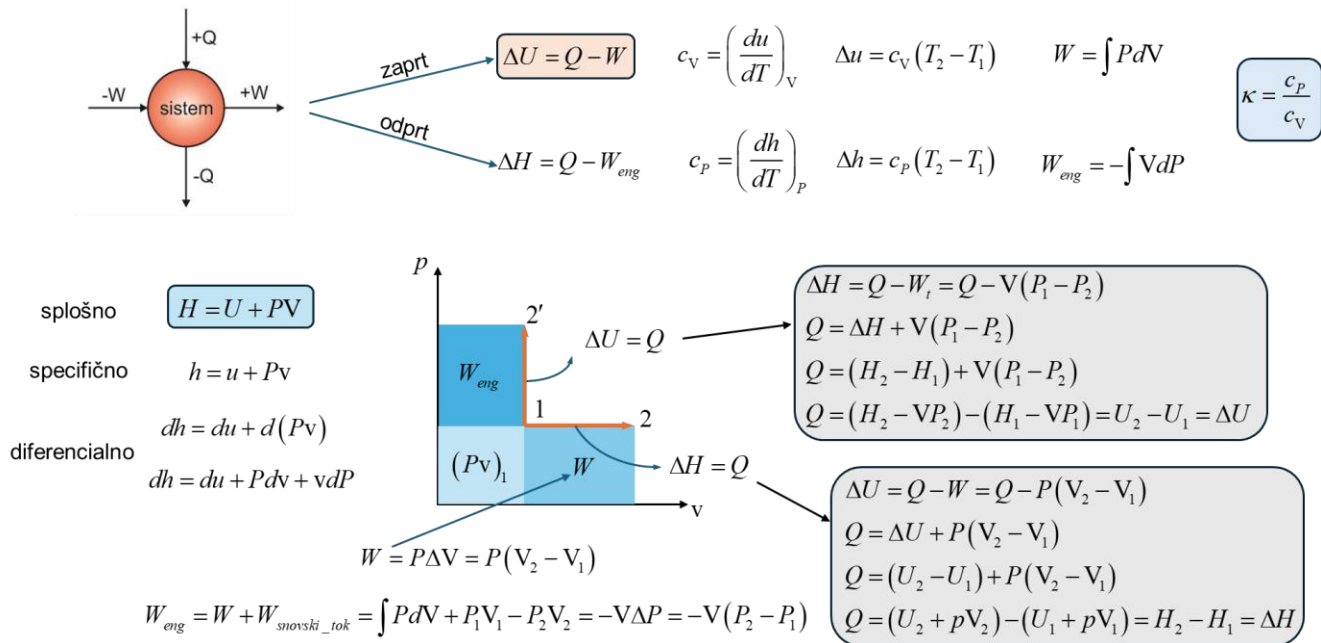
$$V = ?$$

za N_2 $R = 297 \text{ Pa m}^3/\text{kgK}$

$$PV = mRT \Rightarrow V = \frac{mRT}{P} = \frac{1,5 \text{ kg} \times 297 \text{ Pa m}^3/\text{kgK} \times 390 \text{ K}}{690 \times 10^3 \text{ Pa}} = 0,252 \text{ m}^3$$

Notranja energija in entalpija

Notranja energija (U) je celotna energija, ki jo vsebuje sistem, vključno s kinetično in potencialno energijo njegovih molekul. Entalpija (H) je sorodna lastnost, definirana kot vsota notranje energije sistema in produkta njegovega tlaka in prostornine. Entalpija je še posebej uporabna pri opisovanju prenosa toplote pri konstantnem tlaku, medtem ko je notranja energija bolj pomembna pri procesih s konstantno prostornino.



3.3 Notranjo energijo 2 kg zraka zmanjšamo za 50 kJ med procesom hlajenja. Na začetku je zrak imel temperaturo 40 °C. Ob predpostavki idealnega obnašanja plina in konstantnih specifičnih toplot določite končno temperaturo zraka.

$m = 2 \text{ kg}$ $\Delta U = -50 \text{ kJ}$ $T_1 = 40 \text{ °C}$ $T_2 = ?$

Za zrak $\overbrace{c_p = 1,013 \text{ kJ/kgK}}^{\text{SP}}$ ob 313,15 K $\Rightarrow c_v = \frac{c_p}{\kappa} = \frac{1,013 \text{ kJ/kgK}}{1,4} = 0,7236 \text{ kJ/kgK}$

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1) \Rightarrow T_2 = \frac{\Delta U + mc_v T_1}{mc_v} = \frac{-50 \text{ kJ} + 2 \text{ kg} \times 0,7236 \text{ kJ/kgK} \times 40 \text{ °C}}{2 \text{ kg} \times 0,7236 \text{ kJ/kgK}} = 5,45 \text{ °C}$$

3.4 0,5 kg metana ima 500 kPa in 25 °C. Nato metan ekspandira izotermno, dokler se njegov začetni volumen ne podvoji. Ob predpostavki idealnega plina s konstantnima specifičnima toplotama določite: (a) začetni volumen, (b) končni tlak, (c) spremembo specifične notranje energije in (d) spremembo specifične entalpije metana.

$$m = 0,5 \text{ kg} \quad P_1 = 500 \text{ kPa} \quad T_1 = T_2 = 25 \text{ °C} = 298,15 \text{ K} \quad V_2 = 2V_1$$

$$T_2 = ?$$

Za CH₄ ob 300 K, $R = 0,5182 \text{ kJ/kgK}$, $c_p = 2,2537 \text{ kJ/kgK}$, $c_v = 1,7354 \text{ kJ/kgK}$.

$$V_1 = \frac{mRT_1}{P_1} = \frac{0,5 \text{ kg} \times 0,5182 \text{ kJ/kgK} \times 298,15 \text{ K}}{500 \times 10^3 \text{ Pa}} = 0,154 \text{ m}^3 \Rightarrow V_2 = 2V_1 = 0,308 \text{ m}^3$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{500 \times 10^3 \text{ Pa} \times 0,154 \text{ m}^3}{0,308 \text{ m}^3} = 250 \text{ kPa}$$

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = 1,7354 \text{ kJ/kgK} \times (25 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) = 0 \text{ J/kg}$$

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1) = 2,2537 \text{ kJ/kgK} \times (25 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) = 0 \text{ J/kg}$$

Pri izotermnem procesu se entalpija in notranja energija ne spremenita !!!

3.5 Ob predpostavki, da je železo nestisljiva snov s $c = 0,42 \text{ kJ/kgK}$, določite spremembo notranje energije 5 kg železa, pri segrevanju od 25 °C do 200 °C.

$$c = 0,42 \text{ kJ/kgK} \quad m = 5 \text{ kg} \quad T_1 = 25 \text{ °C} \quad T_2 = 200 \text{ °C}$$

$$\Delta U = ?$$

$$\Delta U = mc(T_2 - T_1) = 5 \text{ kg} \times 0,42 \text{ kJ/kgK} \times (200 \text{ °C} - 25 \text{ °C}) = 367,5 \text{ kJ}$$

3.6 V uparjalniku segrevamo vodo od začetnih $T_1 = 40 \text{ °C}$ na $T_2 = 340 \text{ °C}$ pri konstantnem tlaku $P = 40 \text{ bar}$. Kakšno je končno stanje (faza) in kolikšna je dovedena specifična toplota? Proces skicirajte v P - v diagramu.

Končna faza → pregreta para

$$q_{do} = 2899 \text{ kJ/kg}$$

4 Prvi glavni zakon termodinamike

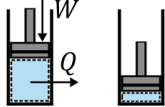
Prvi zakon pravi, da energija ne nastane iz nič in se nikoli ne izniči. To velja za vsak termodinamski sistem. Od tod lahko naš sistem definiramo s pomočjo notranje energije, kinetične energije, potencialne energije, prenosa toplote in dela. V skladu s prvim zakonom obstaja ravnovesje energije, ki velja v katerem koli stanju.

SISTEM

zaprt

odprt

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

$$m \left((u_2 - u_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = Q - W$$


$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W_{eng} + \underbrace{W_{snovski_tok}}_{-\Delta H} - \Delta U - \Delta KE - \Delta PE$$

$$\Delta H + \left(m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) \right) = Q - W_{eng}$$

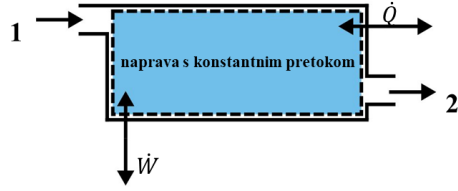
$$\frac{dE}{dt} = 0 \Rightarrow 0 = Q - W_{ing} - \Delta H - \Delta KE - \Delta PE$$

$$\Delta H + \Delta KE + \Delta PE = Q - W_{ing}$$

$$m \left((h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = Q - W_{eng}$$

$$\sum_{i=1}^{Out} m_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_{j=1}^{In} m_j \left(h_j + \frac{v_j^2}{2} + gz_j \right) = Q - W_{eng}$$

- Turbine
- Toplotna črpalka
- Šobe
- Kompressor



$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$

Stacionarno stanje in konstantni pretok

$$\begin{cases} \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng} \\ \dot{m}(h_2 - h_1) = 0 \end{cases}$$

Naloge

4.1 Para pri 500 °C in 10,0 MPa teče v turbino skozi krožni kanal s premerom 5,0 cm. Volumski pretok pare znaša 8,0 m³/s. Določite hitrost in masni pretok pare na vstopu v turbino.

$$T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_1 = 10 \text{ MPa} \quad d = 0,05 \text{ m} \quad \dot{V} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = ?$$

$$v = 0,03276 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{SP})$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{8 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi d^2/4} = \frac{8 \text{ m}^3/\text{s}}{3,14 \times (0,05 \text{ m})^2/4} = 4,076 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{8 \text{ m}^3/\text{s}}{0,03276 \text{ m}^3/\text{kg}} = 244,2 \text{ kg/s}$$

4.2 Masa vode v posodi se po času spreminja kot $dm/dt = 6,0 - 0,5t + 0,003t^2$. V enačbi je t v sekundah in m je v kilogramih. Določite spremembo mase vode v posodi po petih sekundah.

$$dm/dt = 6,0 - 0,5t + 0,003t^2$$

$$\Delta m = ?$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = 6,0 - 0,5t + 0,003t^2$$

$$\Delta m = \int \dot{m} dt = \int_0^5 (6,0 - 0,5t + 0,003t^2) dt = \left| 6,0t - 0,25t^2 + 0,001t^3 \right|_0^5 = 23,875 \text{ kg}$$

4.3 Stroj deluje v ustaljenem stanju z ustaljenim tokom. Stroj prejme 45,2 kW toplote, vstopajoča masa prinaša 165 kW energije in stroj proizvaja 65,6 kW moči. Določite energijski tok, ki odteka skupaj z maso iz iztoka.

$$\dot{Q} = 45,2 \text{ kW} \quad \dot{W}_{eng} = 65,6 \text{ kW} \quad \dot{W}_{in} = 165 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{out} = ?$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_{eng} + \dot{W}_{snovski_tok} = \dot{Q} - \dot{W}_{eng} + \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}$$

v ustaljenem stanju z ustaljenim tokom $\frac{dE}{dt} = 0$

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eng} + \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out} = 0$$

$$\dot{W}_{out} = \dot{Q} - \dot{W}_{eng} + \dot{W}_{in} = 45,2 \text{ kW} - 65,6 \text{ kW} + 165 \text{ kW} = 144,6 \text{ kW}$$

4.4 Para pri 400 kPa in 300 °C vstopa v izolirano šobo pri 8 m/s in izstopa iz nje pri 300 kPa in 280 °C. Določite izstopno hitrost pare.

$P_1 = 400 \text{ kPa}$	$T_1 = 300 \text{ °C}$	$v_1 = 8 \text{ m/s}$	$P_2 = 300 \text{ kPa}$	$T_2 = 280 \text{ °C}$	$v_2 = ?$
-------------------------	------------------------	-----------------------	-------------------------	------------------------	-----------

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{in} \quad (\text{Sistem je izoliran in nimamo podatkov o višini in delu.})$$

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) = 0$$

$h_1 = 3067 \text{ J/kg} \quad (P = 4 \text{ bar}, 300 \text{ °C})$	}	SP
$h_2 = 3029 \text{ J/kg} \quad (P = 3 \text{ bar}, 280 \text{ °C})$		

$$v_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + v_1^2} = \sqrt{2 \times (3067 - 3029) \times 1000 \text{ J/kg} + (8 \text{ m/s})^2} = 275,7 \text{ m/s}$$

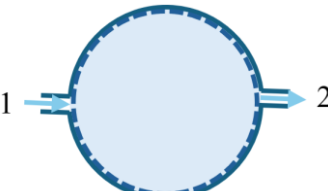
4.5 Črpalka se uporablja za povečanje tlaka vode iz 100 kPa na 20 MPa. Voda vstopa pri 20 °C in izstopa pri 40 °C. Masni pretok vode je 10 kg/s. Toplotne izgube črpalke znašajo 10 kW. Določite moč, ki jo potrebuje črpalka.

$P_1 = 100 \text{ kPa}$	$T_1 = 20 \text{ °C}$	$P_2 = 20 \text{ MPa}$	$T_2 = 40 \text{ °C}$	$\dot{m} = 10 \text{ kg/s}$	$\dot{Q} = 10 \text{ kW}$	$\dot{W}_{eng} = ?$
-------------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------------	---------------------------	---------------------

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$

$h_1 = 84 \text{ kJ/kg}$	}	SP.
$h_2 = 185,1 \text{ kJ/kg}$		

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$



$$\dot{W}_{eng} = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{Q} = 10 \text{ kg/s} (84 - 185,1) \text{ kJ/kg} - 10 \text{ kW} = -1021 \text{ kW}$$

4.6 Izolirana parna turbina prejema paro pri 5,0 MPa in 400 °C. Para zapuška turbino pri 10 kPa s suhostjo 0,95. Volumski pretok v turbino je 2,5 m³/s. Določite moč turbine.

$$P_1 = 5 \text{ MPa} \quad T_1 = 400 \text{ °C} \quad P_2 = 10 \text{ kPa} \quad x_2 = 0,95 \quad \dot{V}_1 = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{W}_{eng} = ?$$

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$

$$\dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{W}_{eng} = P$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{2,5 \text{ m}^3/\text{s}}{0,05779 \text{ m}^3/\text{kg}} = 43,26 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

(S.P. str. 200)

$$\dot{W}_{eng} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 43,26 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (3198 - 2465,38) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 31,7 \text{ MW}$$

$$h_1 = 3198 \text{ kJ/kg} \quad (P = 50 \text{ bar}, 400 \text{ °C}) \quad \text{S.P. str. 200}$$

$$h' = 191,8 \text{ kJ/kg} \quad h'' = 2585 \text{ kJ/kg} \quad (P = 0,1 \text{ bar}, 45,83 \text{ °C}) \quad \text{S.P. str. 190}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'}$$

$$h_2 = \bar{x}_2(h'' - h') + h' = 0,95 \times (2585 - 191,8) \text{ kJ/kg} + 191,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow h_2 = 2465,38 \text{ kJ/kg}$$

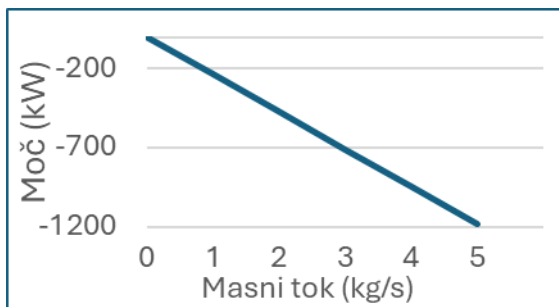
4.7 Izoliran kompresor naj komprimira zrak iz 100 kPa na 700 kPa. Zrak vstopa pri 15 °C in izstopa pri 250 °C. (a) Z uporabo lastnega modela kompresorja narišite graf moči za pogon kompresorja v odvisnosti od masnega pretoka od 0,005 kg/s do 5 kg/s. (b) Določite interval masnih pretokov zraka, ki jih ta kompresor lahko dobavi, če je najvišja moč, ki jo lahko električni sistem kompresorja še prenese 300 kW.

$$P_1 = 100 \text{ kPa} \quad T_1 = 15 \text{ °C} \quad T_2 = 250 \text{ °C} \quad P_2 = 700 \text{ kPa}$$

$$\dot{m} = ?$$

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$

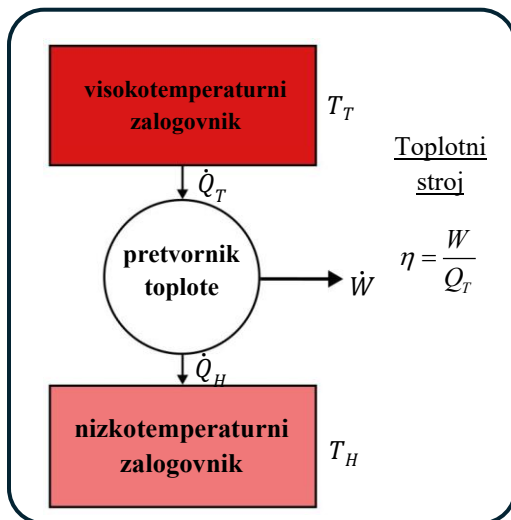
$$\dot{W}_{eng} = \dot{m}(h_1 - h_2) \Rightarrow \dot{W}_{eng} \approx \dot{m}c_p(T_1 - T_2)$$



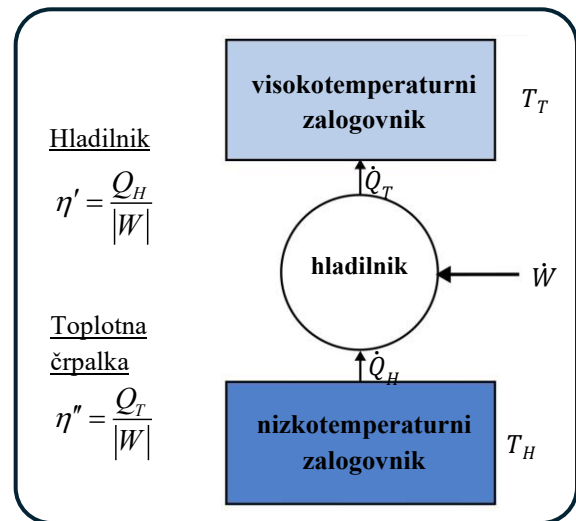
$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{eng}}{c_p(T_1 - T_2)} = \frac{-300 \text{ kW}}{1,005 \text{ kJ/kgK}(-235 \text{ K})} = 1,27 \text{ kg/s}$$

$$0 \leq \dot{m} \leq 1,27 \text{ kg/s}$$

Toplotni stroj



Hladilnik, toplotna črpalka



$$u\check{c}inkovitost = \frac{energija(\check{z}elena)}{energija(vnesena)}$$

4.8 Toplotna črpalka sprejema 15 kW toplotnega toka iz hladnega prostora in porablja 5 kW moči. Določite grelni število toplotne črpalke in toploto, dovedeno toplemu prostoru.

$$\dot{Q}_H = 15 \text{ kW} \quad \dot{W} = -5 \text{ kW}$$

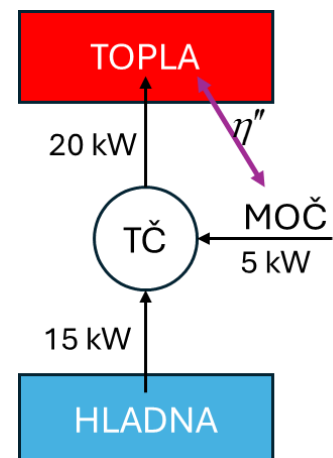
$$\eta'' = ?$$

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_H + \dot{Q}_T = \dot{W}$$

$$\dot{Q}_T = \dot{W} - \dot{Q}_H$$

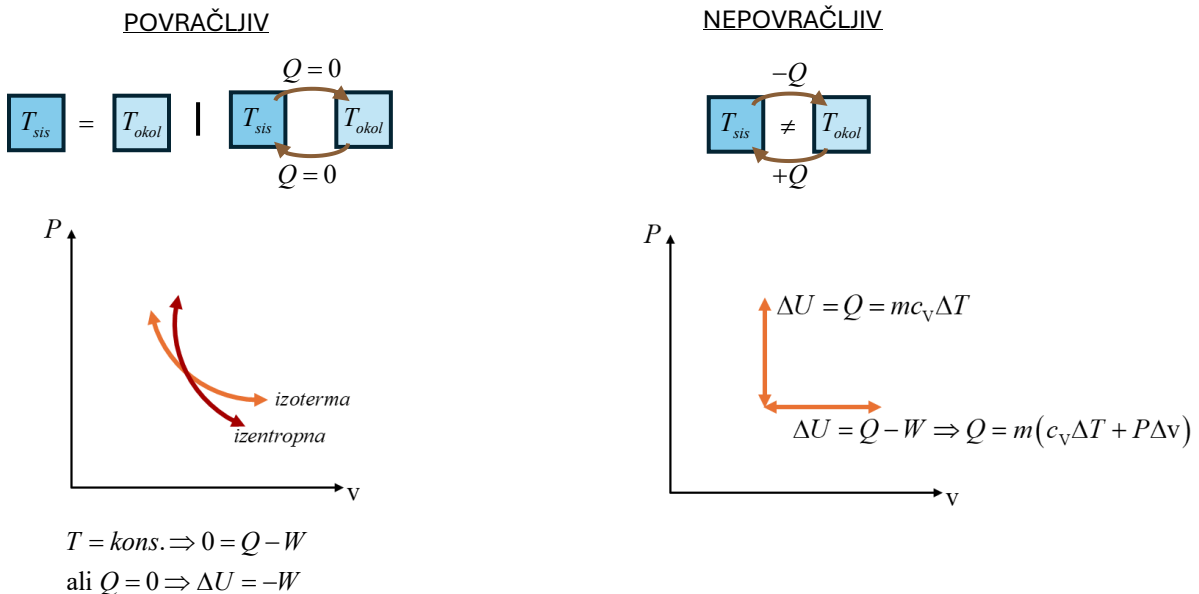
$$\dot{Q}_T = -5 \text{ kW} - 15 \text{ kW} = -20 \text{ kW}$$

$$\eta'' = \frac{|\dot{Q}_T|}{|\dot{W}|} = \frac{20 \text{ kW}}{5 \text{ kW}} = 4$$



5 Uvod k drugemu glavnemu zakonu termodinamike

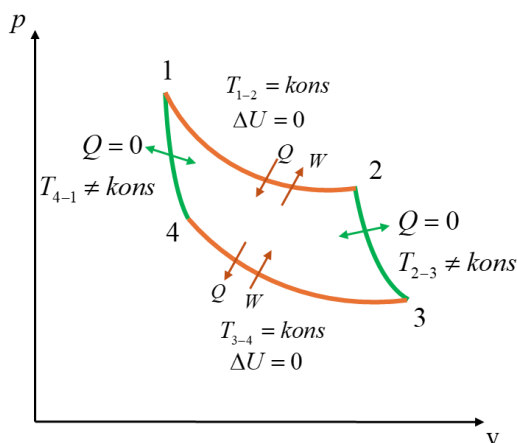
Povračljiv proces je proces, pri katerem se sistem in okolje lahko vrneta v popolnoma enako začetno stanje, kot sta bila pred začetkom procesa, če se po isti poti procesa pomikamo nazaj. Naravni procesi so običajno nepovračljivi. To pomeni, da ko se naravni proces enkrat zgodi, ga ni mogoče razveljaviti in vrniti sistema in njegove okolice v njuno začetno stanje brez zunanjega posredovanja ali vnosa energije. Izotermni proces, ki omogoča prenos toplote, je lahko reverzibilen, če pri tem ne nastaja entropija. Drug primer je adiabatni sistem, ki ne prepušča toplote in ne generira entropije - tak sistem je izentropen in prav tako reverzibilen. Nasprotno pa so izobarni in izohorni procesi običajno nepovračljivi (ireverzibilni).



Carnotov Krožni Proces

Primer reverzibilni cikla je cikel, ki ga sestavljajo 4 reverzibilni procesi, 2-krat izotermni in 2-krat izentropni. Ker so reverzibilni procesi najučinkovitejši, lahko dosežemo najvišjo možno učinkovitost v ciklu, kot je predlagal Carnot.

Carnot – Pv diagram in izentropni proces



Ideal – povračljiv - maksimalni izkoristek

$$Q = \Delta U + W$$

$$dQ = m(c_v dT + P dv)$$

$$0 = c_v dT + P dv \quad (\text{Adiabatni proces})$$

$$0 = \frac{c_v}{R} (v dP + P dv) + P dv$$

$$0 = \frac{c_v + R}{R} P dv + \frac{c_v}{R} v dP \quad 0 = \frac{R}{c_v} \left(\frac{c_v + R}{R} P dv + \frac{c_v}{R} v dP \right)$$

$$0 = \frac{R}{c_v} \left(\frac{c_p}{R} P dv + \frac{c_v}{R} v dP \right) \quad 0 = \frac{c_p}{c_v} P dv + v dP = \kappa P dv + v dP$$

$$\kappa \frac{dv}{v} + \frac{dP}{P} = 0 \quad \kappa \int \frac{dv}{v} + \int \frac{dP}{P} = \int 0 \Rightarrow \kappa \ln v + \ln P = \text{kons.}$$

$$\ln v^\kappa + \ln P = \text{kons.}$$

$$\ln(v^\kappa P) = \text{kons.} \Rightarrow P v^\kappa = \text{kons.}$$

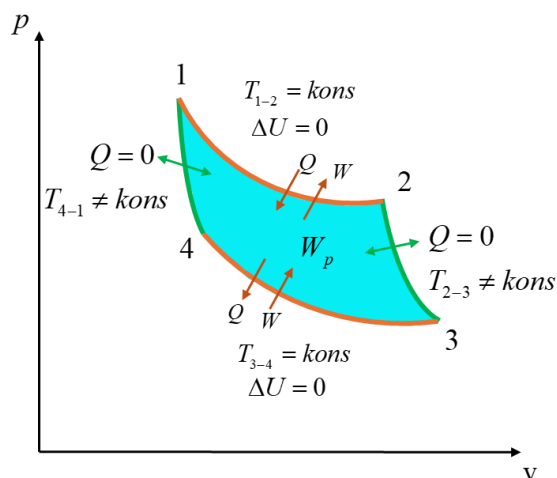
$$P v^\kappa = \text{kons.}$$

$$\left(P = \frac{T}{v} R \right)$$

$$T v^{\kappa-1} = \text{kons.}$$

$$\begin{aligned} P v &= R T \\ d(P v) &= d(R T) \\ v dP + P dv &= R dT \\ dT &= \frac{v dP + P dv}{R} \end{aligned}$$

Carnotov krožni proces – izračun učinkovitosti



Ideal – povračljiv - maksimalni izkoristek

izoterma	izentropna	
$Q_{12} = W_{12} = mRT_{12} \ln \frac{V_2}{V_1}$	$P_2 v_2^\kappa = P_3 v_3^\kappa$	$T_2 v_2^{\kappa-1} = T_3 v_3^{\kappa-1}$
$Q_{34} = W_{34} = mRT_{34} \ln \frac{V_4}{V_3}$	$P_4 v_4^\kappa = P_1 v_1^\kappa$	$T_1 v_1^{\kappa-1} = T_4 v_4^{\kappa-1}$

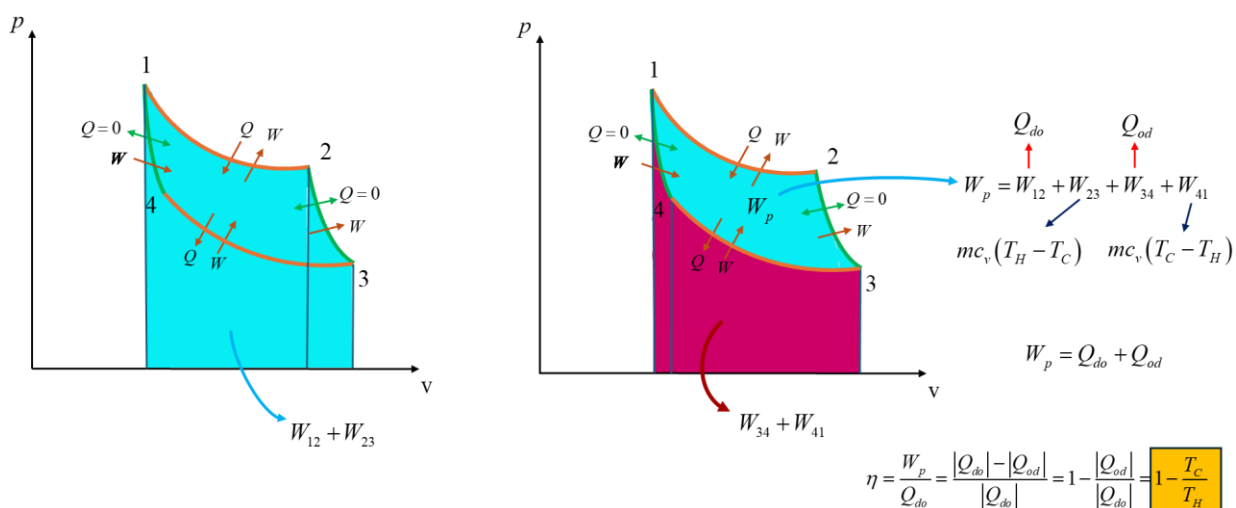
$$|Q_{34}| = |W_{34}| = mRT_{34} \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\frac{T_2 v_2^{\kappa-1}}{T_1 v_1^{\kappa-1}} = \frac{T_3 v_3^{\kappa-1}}{T_4 v_4^{\kappa-1}} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4} \Rightarrow \frac{|Q_{12}|}{|Q_{34}|} = \frac{T_{12}}{T_{34}}$$

$$W_p = Q_{12} + Q_{34} = |Q_{12}| - |Q_{34}| = |Q_{do}| - |Q_{od}|$$

$$\eta = \frac{W_p}{Q_{do}} = \frac{|Q_{do}| - |Q_{od}|}{|Q_{do}|} = 1 - \frac{|Q_{od}|}{|Q_{do}|} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Carnotov krožni proces – demonstracija učinkovitosti na diagramu



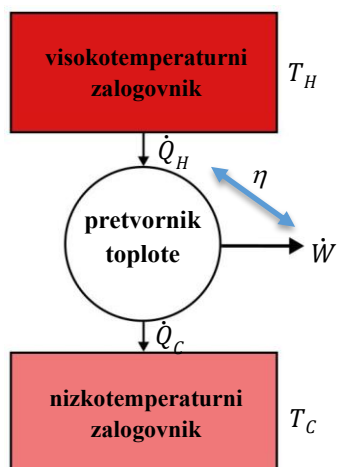
Naloge

5.1 Toplotni stroj deluje med rezervoarjema pri 700 K in 400 K. Toplotni stroj prejema 1500 kW toplote iz visokotemperaturnega rezervoarja. Kolikšna je največja moč, ki jo lahko stroj proizvede?

$$T_H = 700 \text{ K}$$

$$T_C = 400 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{\max} = ?$$



$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{|\dot{Q}_H| - |\dot{Q}_C|}{|\dot{Q}_H|} = 1 - \frac{|\dot{Q}_C|}{|\dot{Q}_H|}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

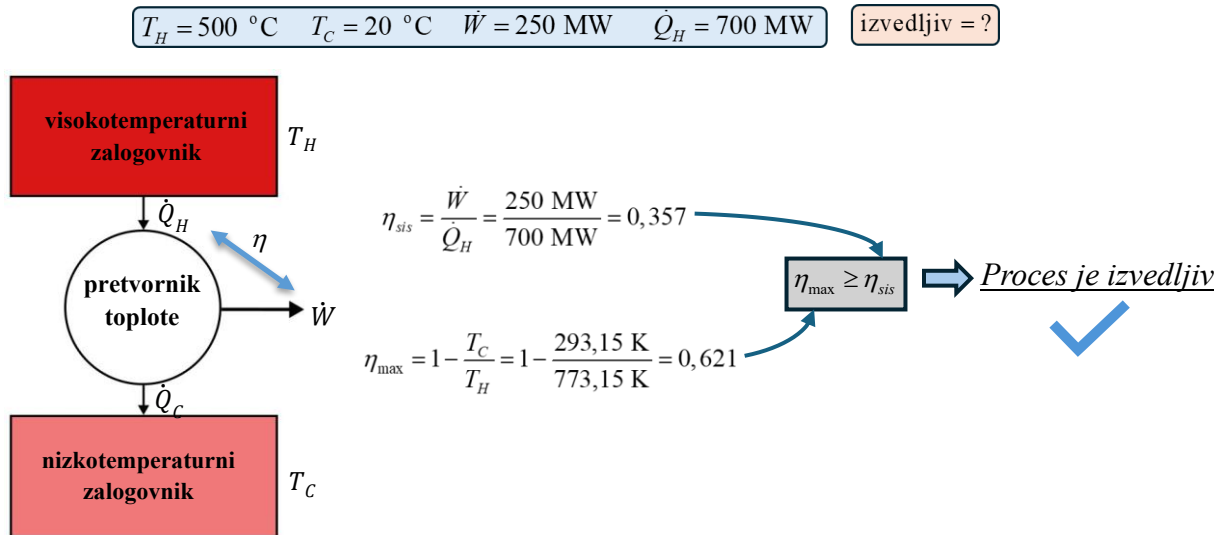
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{400 \text{ K}}{700 \text{ K}} = 0,43$$

$$\eta_{\max} = \frac{\dot{W}_{\max}}{\dot{Q}_T} \Rightarrow \dot{W}_{\max} = \eta_{\max} \dot{Q}_T$$

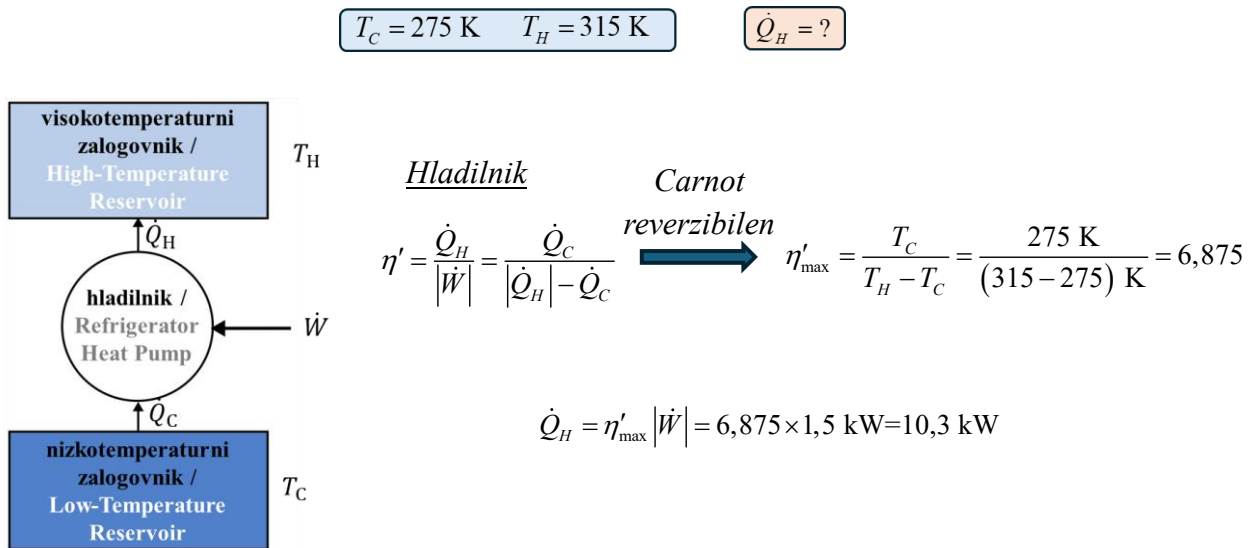
$$\dot{W}_{\max} = 0,43 \times 1500 \text{ kW} = 645 \text{ kW}$$

$$\left(\frac{|\dot{Q}_C|}{|\dot{Q}_H|} \right)_{\text{rev}} = f(T_H, T_C) = \frac{T_C}{T_H}$$

5.2 Inženir vam prinese preprost načrt termoelektrarne. Toploto naj bi se dovajalo pri 500 °C in odvajalo pri 20 °C. Elektrarna naj bi proizvajala 250 MW moči ob dovajanju 700 MW toplote. Ali je ta proces izvedljiv?



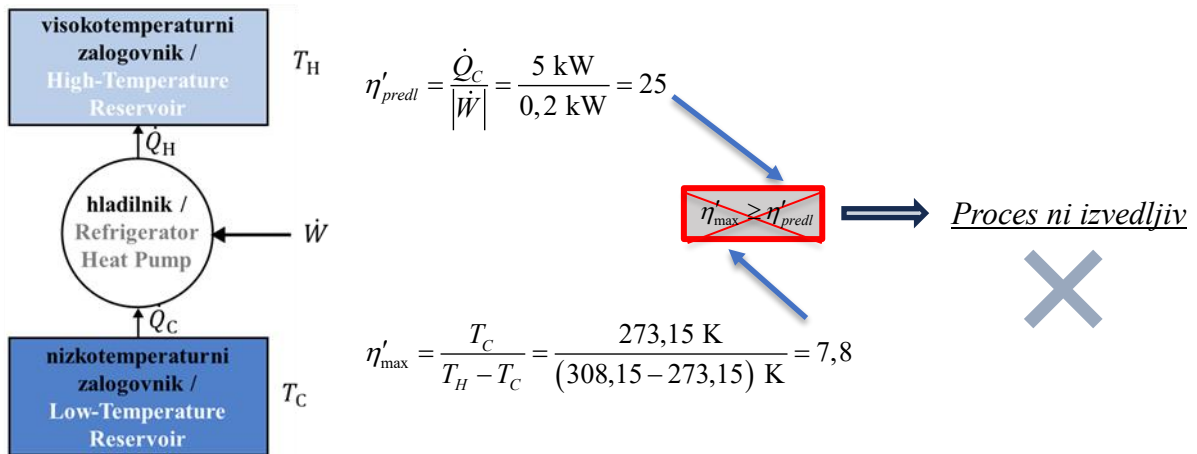
5.3 Hladilnik moči 1,5 kW ohranja hladen prostor pri 275 K, medtem ko oddaja toploto pri temperaturi 315 K. Določite maksimalni toplotni tok, ki ga lahko ta hladilnik odvaja?



5.4 Prodajalec v trgovini vam hoče prodati hladilnik. Pove vam, da hladilnik odvaja toploto iz notranjosti pri temperaturi 0 °C in oddaja toploto okolici pri 35 °C. Doda, da hladilnik v povprečju rabi 200 W moči in da odvaja 5 kW toplote iz hladilnika. Ali bi verjeli njegovim trditvam v povezavi s hladilnikom?

$$T_C = 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_H = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q}_C = 5 \text{ kW} \quad \dot{W} = 0,2 \text{ kW}$$

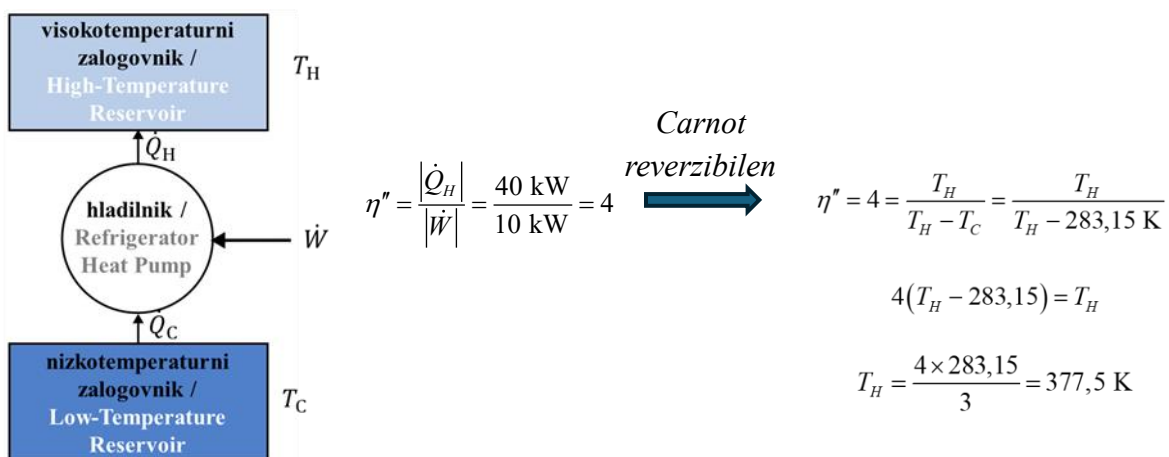
izvedljiv = ?



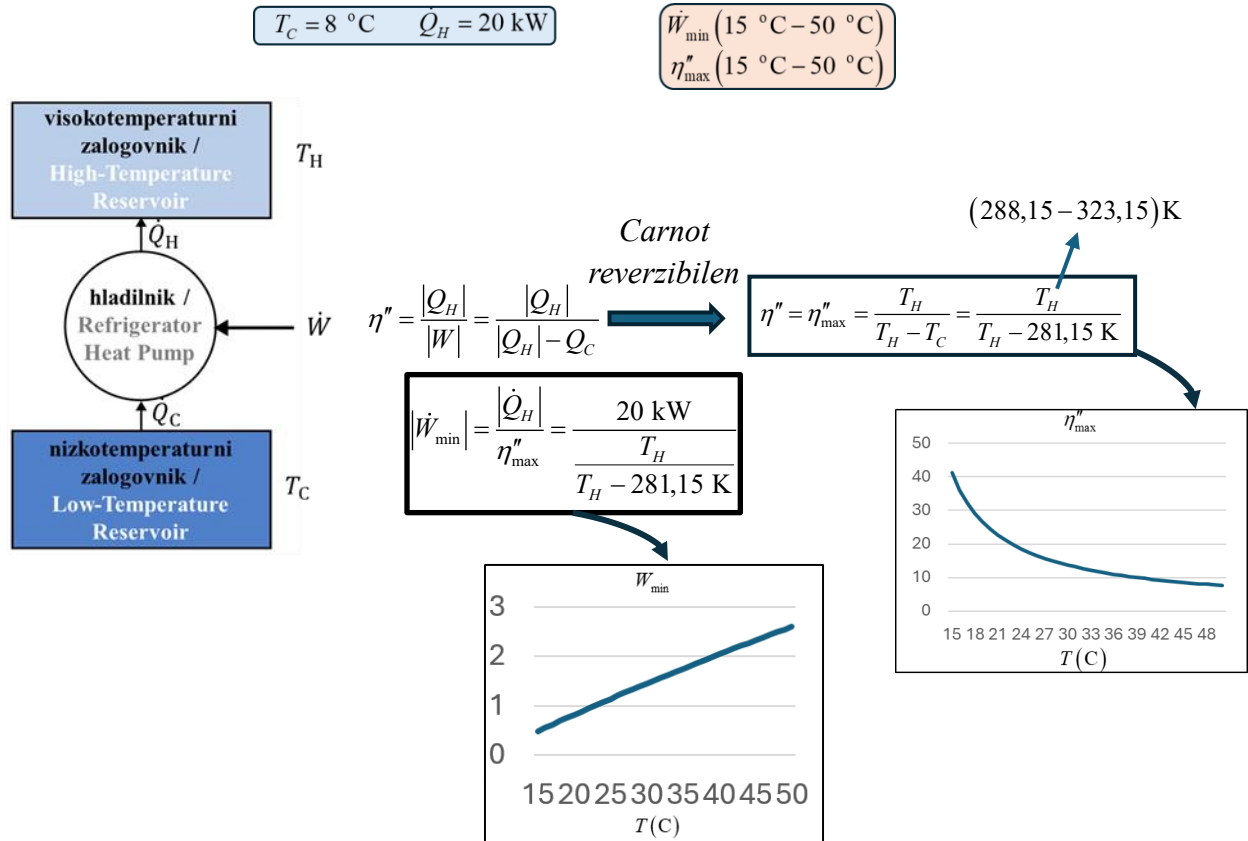
5.5 Toplotna črpalka porablja 10 kW moči, da dovaja 40 kW toplote. Črpalka deluje tako, da kroži hladivo pod zemljo, kjer je temperatura 10 °C, in ga nato dovede toplemu prostoru. Določite najvišjo dosegljivo temperaturo toplega prostora.

$$\dot{W} = 10 \text{ kW} \quad \dot{Q}_H = 40 \text{ kW} \quad T_C = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$T_H = ?$

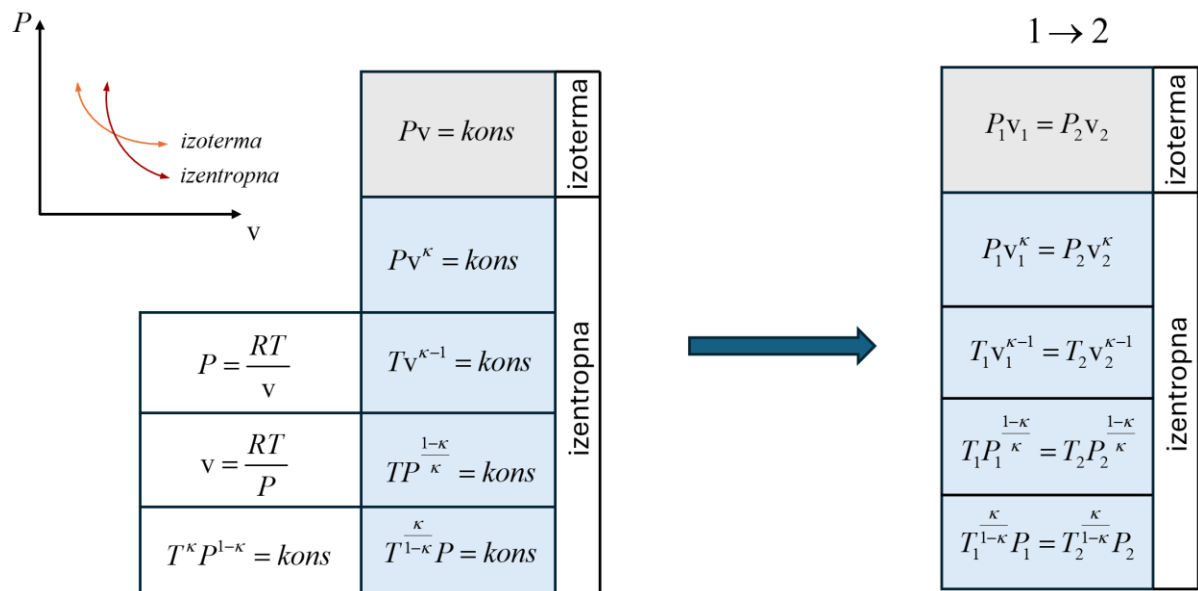


5.6 Toplotna črpalka obratuje z nizkotemperaturnim rezervoarjem pri 8 °C. Toplotna črpalka dobavlja 20 kW toplote visokotemperaturnemu rezervoarju. Narišite graf najvišjega dosegljivega grelnega števila in moči za pogon toplotne črpalke v odvisnosti od temperature visokotemperaturnega rezervoarja od 15 °C do 50 °C.

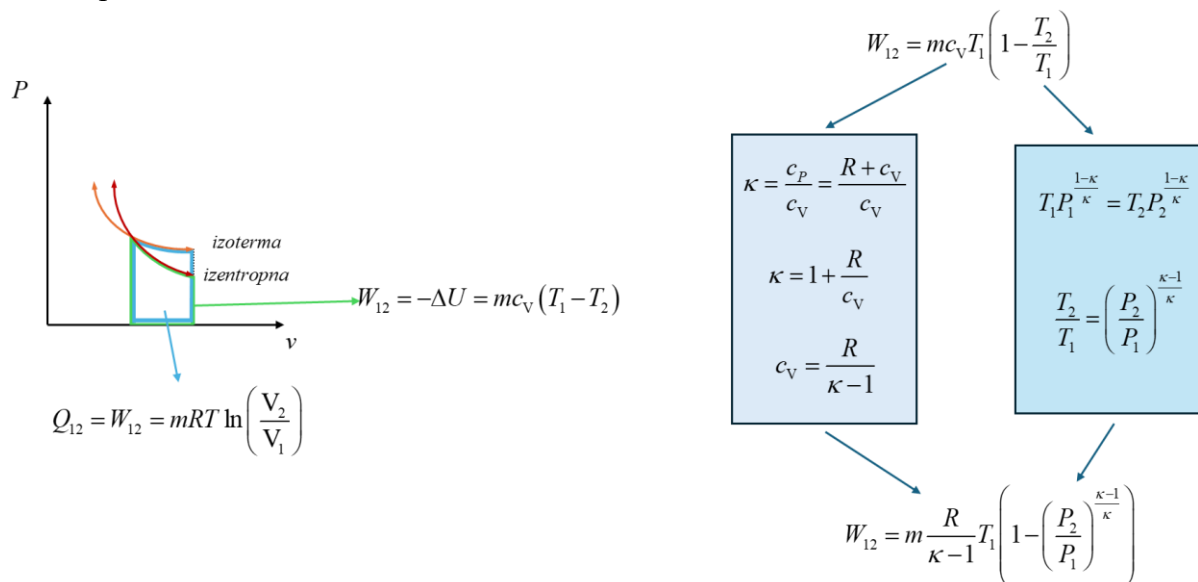


6 Drugi glavni zakon termodinamike

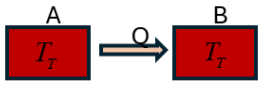
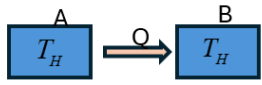
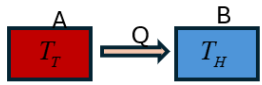
Naravni proces prenosa toplote se nagiba k premikanju od visoke temperature k nizki, dokler ne doseže ravnovesja. Ta proces je nepovračljiv, saj se entropija povečuje. Idealen in najučinkovitejši proces je izentropni oz. adiabatni proces, kjer se entropija ne povečuje. Razmerja za izentropni proces so podana spodaj.



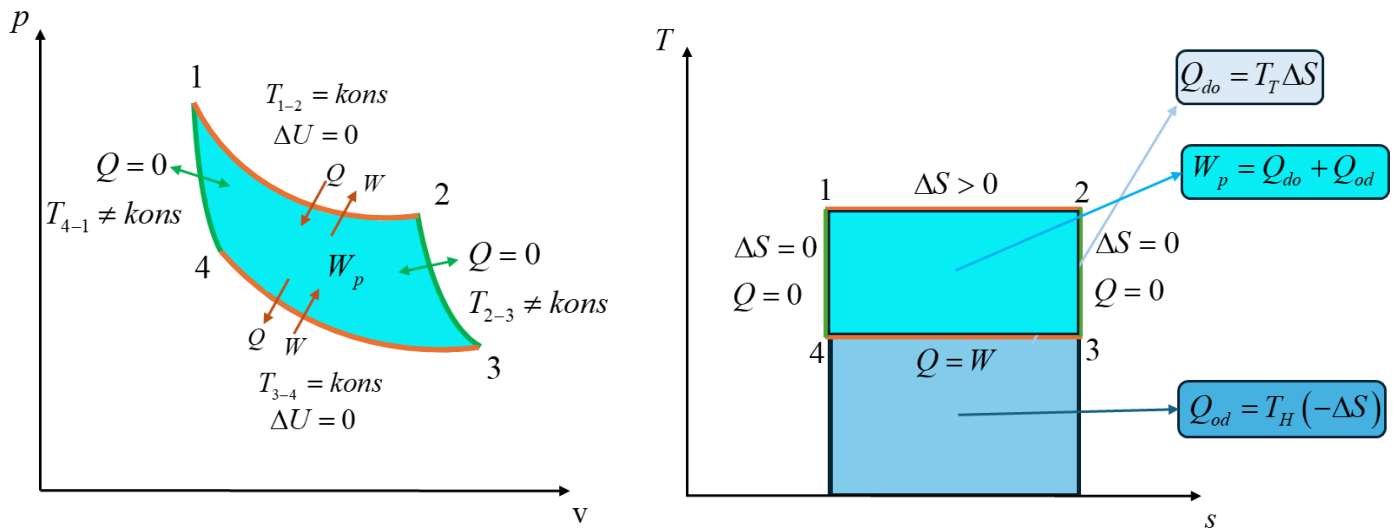
Izentropno delo



Določitev entropije

$\Delta S_{\Gamma} = \frac{Q}{T_{\Gamma}}$		
 $\Delta S_{sis} = \Delta S_{\Gamma_A} + \Delta S_{\Gamma_B} = \frac{-Q}{T_T} + \frac{Q}{T_T} = 0$	$\Delta H = Q - W_{ing}$ $dQ = dH + dW_{ing}$ $dQ = mc_p dT - V dp$ $\frac{dQ}{mT} = \frac{c_p}{T} dT - \frac{v}{T} dp$ $ds = \frac{c_p}{T} dT - \frac{R}{p} dp$ $\int ds = c_p \int \frac{1}{T} dT - R \int \frac{1}{p} dp$	$\Delta U = Q - W$ $dQ = dU + dW$ $dQ = mc_v dT + p dV$ $\frac{dQ}{mT} = \frac{c_v}{T} dT + \frac{p}{T} dV$ $ds = \frac{c_v}{T} dT + \frac{R}{v} dV$ $\int ds = c_v \int \frac{1}{T} dT + R \int \frac{1}{v} dV$
 $\Delta S_{sis} = \Delta S_{\Gamma_A} + \Delta S_{\Gamma_B} = \frac{-Q}{T_H} + \frac{Q}{T_H} = 0$		
 $\Delta S_{sis} = \Delta S_{\Gamma_A} + \Delta S_{\Gamma_B} = \frac{-Q}{T_T} + \frac{Q}{T_H} > 0$	$\Delta s_{\Omega} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$	$\Delta s_{\Omega} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

Carnotov izkoristek predstavljen na T-s diagramu



$$\Delta S = \frac{Q}{T} \Rightarrow \eta_{pov} = \frac{Q_{do} + Q_{od}}{Q_{do}} = \frac{T_T (\Delta S) - T_H (\Delta S)}{T_T (\Delta S)} = 1 - \frac{T_H}{T_T}$$

Politropna preobrazba

V nasprotju z izentropno preobrazbo se v naravi procesi večinoma odvijajo z neko izgubo toplote kar pomeni, da niso več adiabatni. Izentropni preobrazbi podobno preobrazbo z izgubo toplote (povečanjem entropije) imenujemo politropna preobrazba in se kot taka v p-v diagramu nahaja med izentropo in izotermo. Tu koeficient izentropne κ zamenja koeficient politrope n za katerega velja $1 \leq n \leq \kappa$. Zgoraj predstavljene relacije za izentropo, ki povezujejo veličine stanja, enako veljajo tudi za politropo pri čemer se κ zamenja z n . Ker imamo pri politropni preobrazbi neničelno izmenjavo toplote je v tem primeri izraz za izmenjano toploto enak

$$Q_{12} = m c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1),$$

volumsko in inženirsko delo pa sta enaka

$$W_{12} = m c_v \frac{\kappa - 1}{n - 1} (T_1 - T_2), \quad W_{eng12} = n W_{12}.$$

Naloge

6.1 4,2 kg zraka ekspandira na dvakrat večji volumen brez opravljenega dela. Sistem je adiabatan. Za koliko se pri tem poveča entropija?

$$m = 4,2 \text{ kg}$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$\Delta S = ?$$

$$Q = 0, W = 0 \Rightarrow T_1 = T_2$$

$$\Delta S = \Delta S_{\Omega} = m c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + m R \ln \frac{V_2}{V_1} = 4,2 \text{ kg} \times 287 \text{ J/kgK} \times \ln 2 = 835,5 \text{ J/K}$$

6.2 Rezervoar volumna 10 m³ je napolnjen z zrakom pri temperaturi okolice 20 °C in tlaku 120 bar. Zaradi netesnosti se rezervoar popolnoma izprazni v okolico tlaka 1 bar. Kolikšne so izgube dela?

$$V = 10 \text{ m}^3$$

$$T = 20 \text{ °C}$$

$$P_1 = 120 \text{ bar}$$

$$P_2 = 1 \text{ bar}$$

$$W_{izg} = ?$$

$$PV = mRT \Rightarrow m = \frac{120 \times 10^5 \text{ Pa} \times 10 \text{ m}^3}{287 \text{ J/kgK} \times 293,15 \text{ K}} = 1426,3 \text{ kg}$$

$$\Delta S = \Delta S_{\Omega} = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{P_2}{P_1} = -1426,3 \text{ kg} \times 287 \text{ J/kgK} \times \ln \frac{1}{120} = 1959,75 \text{ kJ/K}$$

$$W_{izg} = \Delta S \times T_{ok} = 1959,75 \text{ kJ/K} \times 293,15 \text{ K} = 574,5 \text{ MJ}$$

6.3 Para, ki kondenzira pri 120 °C, odda 125 kJ toplote. Določite spremembo entropije sistema, ki jo povzroči ta prenos toplote.

$$Q = -125 \text{ kJ} \quad T_r = 393,15 \text{ K} \quad \Delta S = ?$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T_r} = \frac{-125 \text{ kJ}}{393 \text{ K}} = -0,318 \text{ kJ/K}$$

6.4 Predmet doživi proces z dvema povračljivima prenosoma toplote. Med tem procesom je 50 kJ toplote dovedenih predmetu preko površine s temperaturo 60 °C in 35 kJ toplote odvedenih preko površine s temperaturo 10 °C. Določite spremembo entropije predmeta med tema procesoma.

$$Q_1 = 50 \text{ kJ} \quad T_{r1} = 60 \text{ °C} = 333,15 \text{ K} \quad Q_2 = -35 \text{ kJ} \quad T_{r2} = 10 \text{ °C} = 283,15 \text{ K} \quad \Delta S = ?$$

$$\Delta S = \Delta S_{r1} + \Delta S_{r2} = \frac{Q_1}{T_{r1}} + \frac{Q_2}{T_{r2}}$$

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_{r1}} + \frac{Q_2}{T_{r2}} = \frac{50 \text{ kJ}}{333,15 \text{ K}} + \frac{-35 \text{ kJ}}{283,15 \text{ K}} = (0,15 - 0,124) \text{ kJ/K} = 0,0265 \text{ kJ/K}$$

6.5 Živo srebro se segreje iz 30 °C na 150 °C. Določite spremembo specifične entropije živega srebra za ta proces.

$$T_1 = 30 \text{ °C} = 303,15 \text{ K} \quad T_2 = 150 \text{ °C} = 423,15 \text{ K} \quad c = 0,139 \text{ kJ/kgK} \quad \Delta s_{\Omega} = ?$$

$$\Delta s_{\Omega} = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

nestisljiv

$$\Delta s_{\Omega} = c \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 0,139 \text{ kJ/kgK} \ln \frac{423,15 \text{ K}}{303,15 \text{ K}} = 0,046 \text{ kJ/kgK}$$

6.6 Zrak ekspandira izentropno v turbini od 800 K in 1000 kPa do tlaka 150 kPa. Masni pretok zraka je 2,0 kg/s. Predpostavite, da se zrak obnaša kot idealni plin s konstantnima specifičnima toplotama in da je turbina adiabatna. Določite izstopno temperaturo zraka in moč, ki jo turbina proizvaja.

$$P_1 = 1000 \text{ kPa} \quad T_1 = 800 \text{ K} \quad P_2 = 150 \text{ kPa} \quad \dot{m} = 2,0 \text{ kg/s}$$

$$T_2 = ?, \quad \dot{W}_{eng} = ?$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 800 \text{ K} \left(\frac{150 \text{ kPa}}{1000 \text{ kPa}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 465 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{eng} = \dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}c_p(T_1 - T_2) = 2,0 \text{ kg/s} \times 1,005 \text{ kJ/kgK} \times (800 - 465) \text{ K} = 673,35 \text{ kW}$$

6.7 1,2 m³ vodne pare tlaka 4 bar in suhosti 0,8 ekspandira izentropno na 0,6 bar. Določite celotno tehnično delo, suhost in prostornino pare na koncu ekspanzije (naloge rešite izključno s tabeliranimi vrednostmi SP).

$$V_1 = 1,2 \text{ m}^3 \quad p_1 = 4 \text{ bar} \quad \bar{x}_1 = 0,8 \quad p_2 = 0,6 \text{ bar}$$

$$w_{eng12} = ?$$

$$h_2 = ?$$

$$T_2 = ?$$

$$\bar{x}_2 = ?$$

$$w_{eng12} = 1040 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2150 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = 35 \text{ °C}$$

$$\bar{x}_2 = 0,83$$

6.8 Izolirani difuzor prejema paro pri 300 kPa in 200 °C s hitrostjo 396 m/s. Para zapušča difuzor s hitrostjo 30 m/s in tlakom 400 kPa. Določite izstopno temperaturo in nastajanje entropije na kg pare med tem procesom.

$$P_1 = 300 \text{ kPa} \quad T_1 = 200 \text{ °C} \quad v_1 = 396 \text{ m/s} \quad P_2 = 400 \text{ kPa} \quad v_2 = 30 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{Q} - \dot{W}_{eng}$$

$$h_2 - h_1 = -\frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

$$T_2 = ?, \quad \Delta s = ?$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 300 \text{ kPa} \\ T_1 = 200 \text{ °C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_1 = 2866 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 7,312 \text{ kJ/kgK} \end{array}$$

$$h_2 = h_1 - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = 2866 \times 10^3 \text{ J/kg} - \frac{(30 \text{ m/s})^2 - (396 \text{ m/s})^2}{2} = 2944 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 400 \text{ kPa} \\ h_2 = 2944 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_2 = 240 \text{ °C} \\ s_2 = 7,340 \text{ kJ/kgK} \end{array}$$

$$\frac{\Delta \dot{S}_{\Omega}}{\dot{m}} = (s_2 - s_1) = (7,340 - 7,312) \text{ kJ/kgK} = 0,028 \text{ kJ/kgK}$$

6.9 Kompresor sesa $3 \text{ m}^3/\text{min}$ CO_2 tlaka 1 bar in temperature 30°C . Kolikšna je porabljena moč, če je kompresija izentropna in končni tlak 15 bar? Kolikšna je temperatura CO_2 po kompresiji?

$$\dot{V} = 3 \text{ m}^3/\text{min} \quad p_1 = 1 \text{ bar} \quad T_1 = 30^\circ\text{C} \quad p_2 = 15 \text{ bar}$$

$$\dot{W} = ? \quad T_2 = ?$$

$$\dot{W} = -18,848 \text{ kW}$$

$$T_2 = 566 \text{ K}$$

6.10 V stroju moči 10 kW politropno ekspandira zrak tlaka 10 bar in temperature 15°C na tlak 1 bar. Kolikšna je končna temperatura in kolikšen je masni tok zraka, če je eksponent politrope 1,3?

$$\dot{W} = 10 \text{ kW} \quad p_1 = 10 \text{ bar} \quad T_1 = 15^\circ\text{C} \quad p_2 = 1 \text{ bar} \quad n = 1,3$$

$$T_2 = ? \quad \dot{m} = ?$$

$$T_2 = 169,28 \text{ K}$$

$$\dot{m} = 0,0677 \text{ kg/s}$$

6.11 Zraku temperature 150°C in tlaka 10 bar izobarno dovajamo toploto, da se mu volumen poveča za $1/3$. Sledi izentropna ekspanzija do tlaka okolice 1 bar. V začetno stanje pridemo s politropno kompresijo. Določi termični izkoristek procesa.

$$T_1 = 150^\circ\text{C} \quad p_1 = 10 \text{ bar} \quad p_2 = 1 \text{ bar}$$

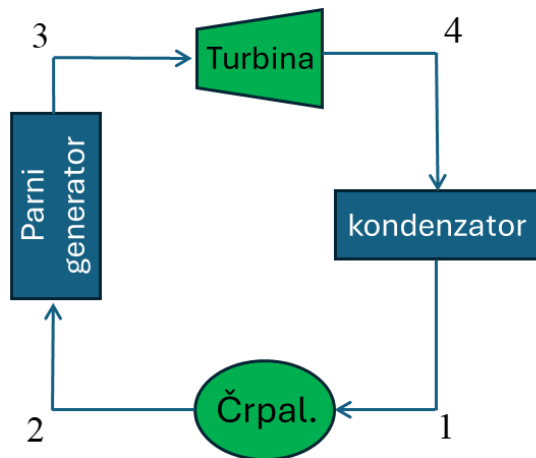
$$\eta = ?$$

$$\eta = 0,1934$$

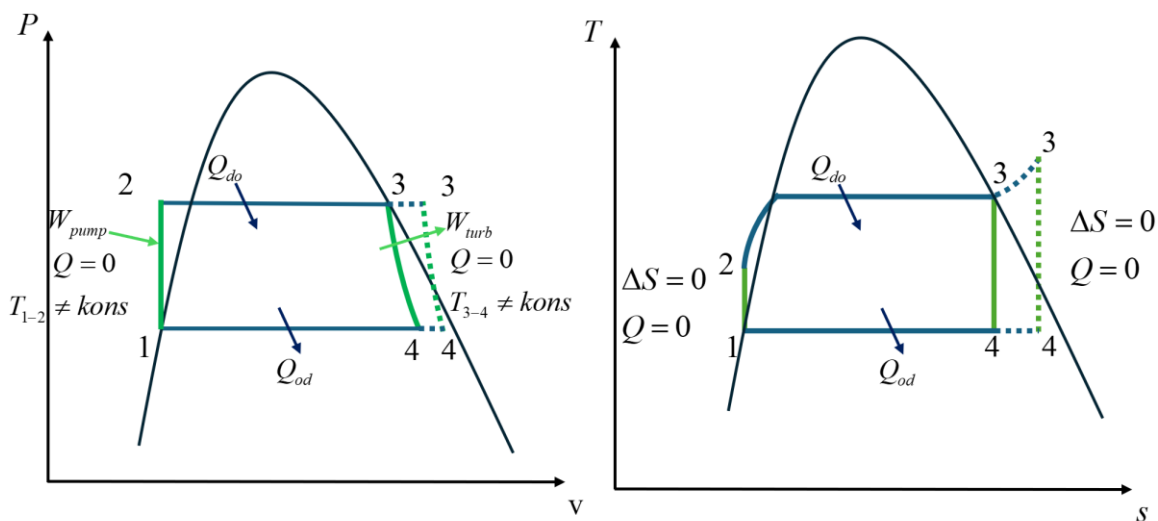
7 Krožni procesi

Krožni procesi za proizvodno dela so eden najpomembnejših konceptov termodinamike. Delovna tekočina neprekinjeno prehaja skozi vrsto zaporednih procesov. Glavni cilj je ustvariti delo ali moč. Delovna tekočina lahko tudi spreminja faze, kot v Rankinejevem ciklu, ali pa ves čas ostaja v plinasti fazi, kot v Brytonovem ciklu. Med procesom se v določenem koraku v sistem dodaja toplota. Izkoristek se nato izračuna kot razmerje med proizvedeno energijo (delom) in vloženo energijo (toploto).

Idealni Rankinov krožni proces



- 1 – 2 izentropna kompresija
- 1 – 3 izobarna dovajena toplota
- 3 – 4 izobarna odvajena toplota
- 4 – 1 izentropna ekspanzija



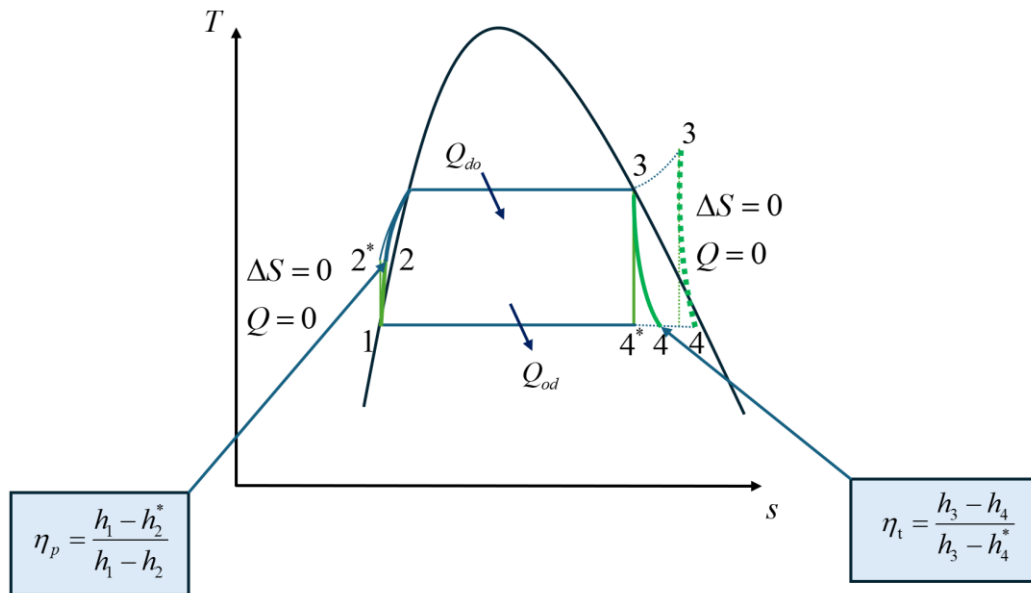
$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

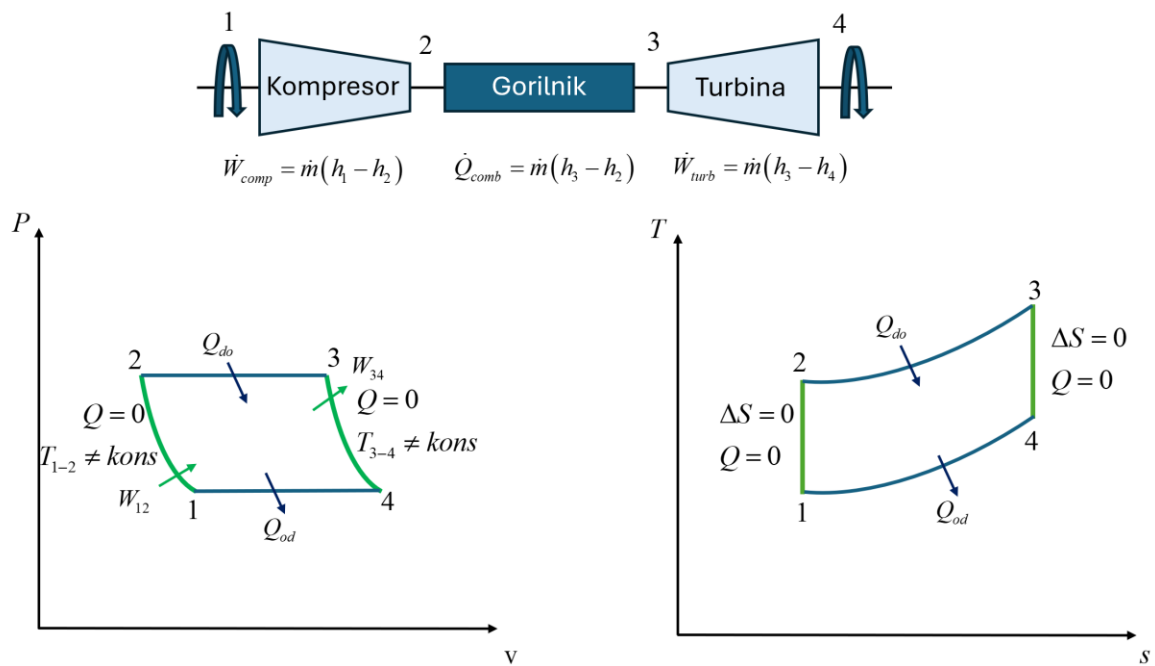
$$\dot{Q}_{sg} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} + \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{sg}} = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2}$$

Neidealni (realni) Rankinov krožni proces



Braytonov krožni proces



Naloge

7.1 V osnovnem idealnem Rankinovem krožnem procesu, ki ima delovno tekočino vodo, suha para zapišča generator pare pri absolutnem tlaku 12,0 MPa in vrela kapljevina zapišča kondenzator pri absolutnem tlaku 7,0 kPa. Masni pretok vode skozi krožni proces je 90 kg/s. Določite skupno proizvedeno moč, generatorju pare dovedeni toplotni tok in termični izkoristek krožnega procesa.

$$P_2 = P_3 = 12 \text{ MPa} \quad P_1 = 7 \text{ kPa} \quad \dot{m} = 90 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{turb} &= ? \\ \dot{Q}_{sg} &= ? \\ \eta &= ? \end{aligned}$$

$$h_1 = \frac{151,5 + 173,9}{2} = 162,7 \text{ kJ/kg} \quad v_1 = \frac{0,001006 + 0,001008}{2} = 0,001007 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (SP)$$

$$\Delta h = Q - W_{mz} \Rightarrow h_2 = h_1 + v_1 (p_2 - p_1) = 162,7 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 0,001007 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (12000 - 7) \times 10^3 \text{ Pa} = 174,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 2689 \text{ kJ/kg} \quad s_3 = 5,5 \text{ kJ/kg K} \Rightarrow s_4 = 5,5 \text{ kJ/kg K} \quad (SP)$$

$$x_4 (p = 7 \text{ kPa}) = \frac{s - s'}{s'' - s'} = \frac{2 \times 5,5 - (0,5209 + 0,5925)}{(8,331 + 8,230) - (0,5209 + 0,5925)} = 0,643$$

$$h_4 = h' + x_4 (h'' - h') = \frac{(151,5 + 173,9)}{2} + 0,643 \left(\frac{(2568 + 2577) - (151,5 + 173,9)}{2} \right) = 1712,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m} (h_3 - h_4) = 90 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (2689 - 1712,2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 87,91 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m} (h_1 - h_2) = 90 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (162,7 - 174,78) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -1,87 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_{sg} = \dot{m} (h_3 - h_2) = 90 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (2689 - 174,78) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 226,28 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} + \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{sg}} = \frac{87,91 - 1,87}{226,28} = 0,38$$

7.2 V Braytonovem krožnem procesu zrak vstopa v kompresor pri 100 kPa in 300 K. Zrak zapušča kompresor pri tlaku 1100 kPa. Masni pretok zraka je 40 kg/s. Z gorilnikom se dovaja 25 MW toplote. Upoštevajte spremembo specifičnih toplot zraka. Določite skupno proizvedeno moč postrojenja, razmerje med močjo kompresorja in turbine ter termični izkoristek krožnega procesa za (a) izentropna turbino in kompresor ter (b) izentropni izkoristek turbine 0,75 in izentropni izkoristek kompresorja 0,75.

$$T_1 = 300 \text{ K} \quad P_1 = 100 \text{ kPa} \quad P_2 = 1100 \text{ kPa} \quad \dot{Q}_{23} = 25 \text{ MW} \quad \eta_t = 0,75 \quad \eta_c = 0,75 \quad \dot{m} = 40 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{turb} &= ? \\ \dot{W}_{comp} / \dot{W}_{turb} &= ? \\ \eta &= ? \end{aligned}$$

$$h_1 = 300,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad P_{r1} = 1,386 \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \kappa \neq \text{kons} \Rightarrow \frac{P_{r1}(T_1, h_1)}{P_{r2}(T_2, h_2)} = \frac{P_1}{P_2} \quad P_{r2}(T_2) = P_{r1}(T_1) \frac{P_2}{P_1} = 1,386 \frac{11}{1} = 15,246$$

$$h_2 = 586,04 + \frac{15,246 - 14,38}{16,28 - 14,38} (607,02 - 586,04) = 595,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

T (K)	h (kJ/kg)	P _r	U (kJ/kg)	v _r	S ⁰ (kJ/kgK)	T (K)	h (kJ/kg)	P _r	U (kJ/kg)	v _r	S ⁰ (kJ/kgK)
200	199.97	0.3363	142.56	1707	1.2956	780	800.03	43.4	576.12	51.64	2.69013
220	219.97	0.469	156.82	1346	1.3911	820	843.98	52.5	608.59	44.84	2.74504
240	240.02	0.6355	171.13	1084	1.4782	860	888.27	63.1	641.4	39.12	2.79783
260	260.09	0.8405	185.45	888	1.5585	900	932.93	75.3	674.58	34.31	2.84856
280	280.13	1.0889	199.75	738	1.6328	940	977.92	89.3	708.08	30.22	2.89748
290	290.16	1.2311	206.91	676	1.668	980	1023.3	105	741.98	26.73	2.94468
300	300.19	1.386	214.07	621	1.702	1020	1068.9	123	776.1	23.72	2.99034
310	310.24	1.5546	221.25	572	1.735	1060	1114.9	144	810.62	21.14	3.03449
320	320.29	1.7375	228.43	529	1.7669	1100	1161.1	167	845.33	18.96	3.07732
340	340.42	2.149	242.82	454	1.8279	1140	1207.6	193	880.35	16.94	3.11883
360	360.58	2.626	257.24	393	1.8854	1180	1254.3	222	915.57	15.241	3.15916
380	380.77	3.176	271.69	343	1.94	1220	1301.3	255	951.09	13.747	3.19834
400	400.98	3.806	286.16	302	1.9919	1260	1348.6	291	986.9	12.435	3.23638
420	421.26	4.522	300.69	267	2.0414	1300	1396	331	1022.82	11.275	3.27345
440	441.61	5.332	315.3	237	2.0887	1340	1443.6	375	1058.94	10.247	3.30959
460	462.02	6.245	329.97	211	2.1341	1380	1491.4	424	1095.26	9.337	3.34474
480	482.49	7.268	344.7	190	2.1776	1420	1539.4	478	1131.77	8.526	3.37901
500	503.02	8.411	359.49	171	2.2195	1460	1587.6	537	1168.49	7.801	3.41247
520	523.63	9.684	374.36	154	2.26	1500	1636	602	1205.41	7.152	3.44516
540	544.35	11.1	389.34	140	2.2991	1540	1684.5	673	1242.43	6.569	3.47712
560	565.17	12	404.42	127	2.3369	1580	1733.2	750	1279.65	6.046	3.50829
580	586.04	14.38	419.55	116	2.3735	1620	1782	834	1316.96	5.574	3.53879
600	607.02	16.28	434.78	106	2.409	1660	1831	926	1354.48	5.147	3.56857
620	628.07	18.36	450.09	96.9	2.4436	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
640	649.22	20.65	465.05	89	2.4772	1800	2003.3	1310	1487.2	3.944	3.6684
660	670.47	23.13	481.01	81.9	2.5099	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.73541
680	691.82	25.85	496.62	75.5	2.5418	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
700	713.27	28.8	512.33	69.8	2.5728	2100	2377.4	2559	1775.3	2.356	3.8605
720	734.82	32.02	528.14	64.5	2.6032	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
740	756.44	35.5	544.02	59.8	2.6328						

Fizikalne lastnosti suhega zraka [3] (str. 491).

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}(h_3 - h_2) \Rightarrow h_3 = \frac{\dot{Q}_{comb}}{\dot{m}} + h_2 = \frac{25000 \text{ kW}}{40 \text{ kg/s}} + 595,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1220,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{r3} = 193,1 + \frac{1220,6 - 1207,57}{1254,34 - 1207,57} (222,2 - 193,1) = 201,2$$

$$\frac{P_{r4}(T_4)}{P_{r3}(T_3)} = \frac{P_4}{P_3} \quad P_{r4}(T_4) = P_{r3}(T_3) \frac{P_4}{P_3} = 201,2 \frac{1}{11} = 18,29 \quad \Rightarrow \quad h_4 = 628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_3 - h_4) = 40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1220,6 - 628) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 23,7 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (300,19 - 586,04) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -11,43 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} + \dot{W}_{comp}}{\dot{Q}_{comb}} = \frac{23,7 - 11,43}{25 \text{ MW}} = 0,49$$

$$h_2 = h_1 + \frac{(h_2^* - h_1)}{\eta_{s,k}} = 300,19 + \frac{(595,6 - 300,19)}{0,75} = 694,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}(h_3 - h_2) \Rightarrow h_3 = \frac{\dot{Q}_{comb}}{\dot{m}} + h_2 = \frac{25000 \text{ kW}}{40 \text{ kg/s}} + 694,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1319,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{r3} = 254,7 + \frac{1319,07 - 1301,31}{1348,55 - 1301,31} (290,8 - 254,7) = 268,27$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_3 - h_4) = 40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1319,07 - 840,36) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 19,15 \text{ MW}$$

$$\frac{P_{r4}(T_4)}{P_{r3}(T_3)} = \frac{P_4}{P_3} \quad P_{r4}(T_4) = P_{r3}(T_3) \frac{P_4}{P_3} = 268,27 \frac{1}{11} = 24,39$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (300,19 - 694,07) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -15,76 \text{ MW}$$

$$h_4^* = 670,47 + \frac{24,39 - 23,13}{25,85 - 23,13} (691,82 - 670,47) = 680,36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} + \dot{W}_{comp}}{\dot{Q}_{comb}} = \frac{19,15 - 15,76}{25 \text{ MW}} = 0,136$$

$$h_4 = h_3 - \eta_1(h_3 - h_4^*) = 1319,07 - 0,75(1319,07 - 680,36) = 840,04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Izentropen proces

$$dS_{\Gamma} = \frac{Q}{T} = 0$$

$$dS_{\Omega} = \frac{dh}{T} - \frac{R}{P} dP = 0$$

$$\Delta S_{\Omega} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p(T)}{T} dT - R \ln \frac{P_2}{P_1} = \underbrace{\int_0^{T_2} \frac{c_p(T)}{T} dT}_{s_2^0} - \underbrace{\int_0^{T_1} \frac{c_p(T)}{T} dT}_{s_1^0} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 0$$

$$\frac{s_2^0 - s_1^0}{R} = \ln \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \exp\left(\frac{s_2^0 - s_1^0}{R}\right) = \frac{Pr_2}{Pr_1}$$

$$\frac{Pr_2}{Pr_1} = \frac{\exp(s_2^0/R)}{\exp(s_1^0/R)}$$

Pr je brez enote ampak je močno odvisen od temperature!

Ottov krožni proces

štiritaktni motor na vžig (bencin)

- 1–2 izentropna kompresija
- 1–3 izohorna dovajena toplota
- 3–4 izentropna ekspanzija
- 4–1 izohorna odvajena toplota

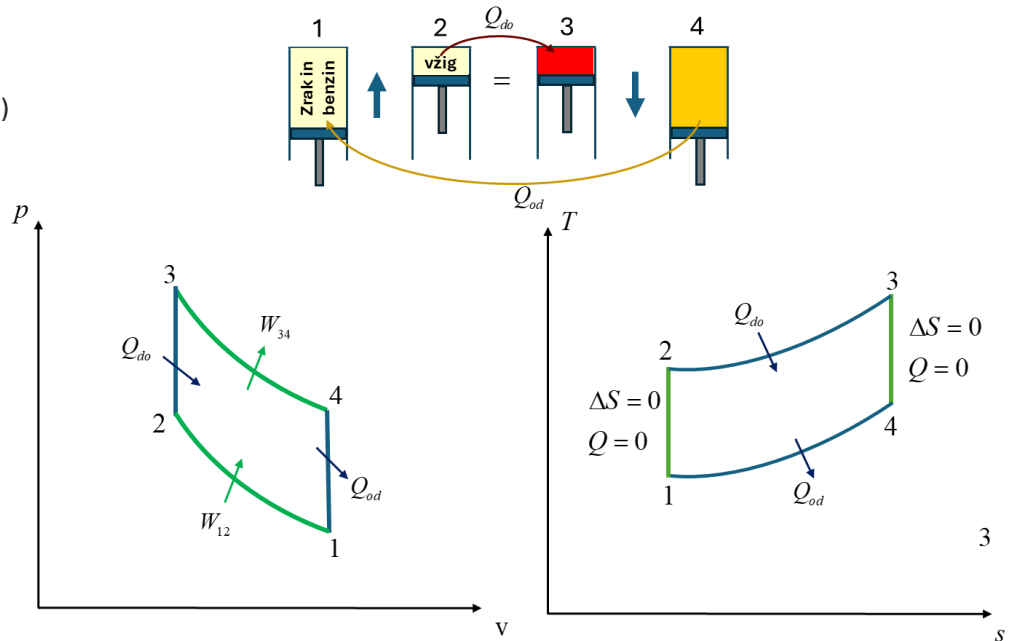
$$W_{12} = m(u_1 - u_2)$$

$$W_{34} = m(u_3 - u_4)$$

$$W_{net} = m(u_1 - u_2 + u_3 - u_4)$$

$$Q_{23} = m(u_3 - u_2)$$

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{23}}$$



(Zaprta sistem za en krog)

Dieselov krožni proces

štiritaktni motor na vžig (dizel)

- 1–2 izentropna kompresija
- 1–3 izobarna dovajena toplota
- 3–4 izentropna ekspanzija
- 4–1 izohorna odvajena toplota

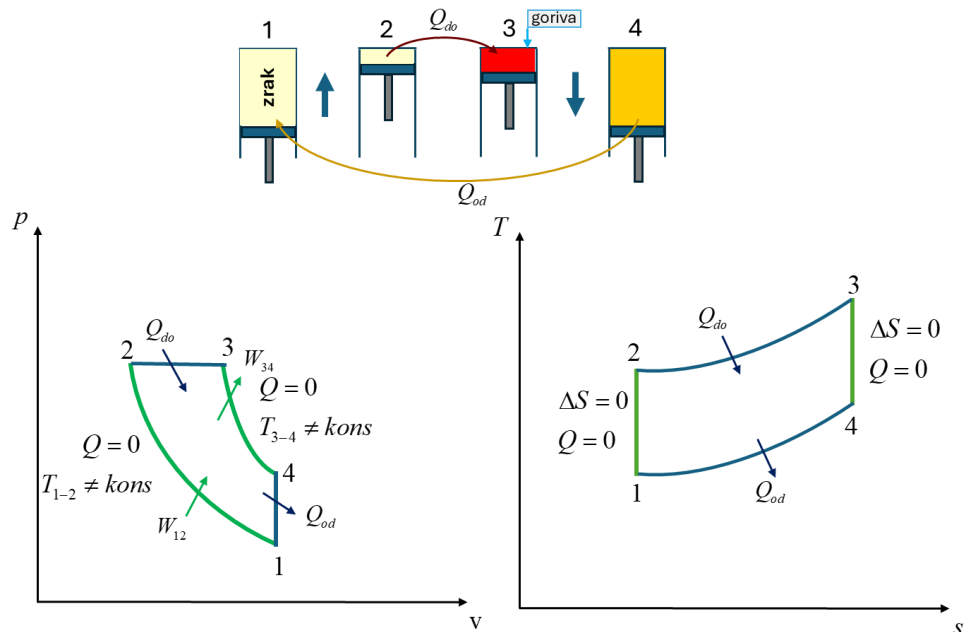
$$W_{12} = m(u_1 - u_2)$$

$$W_{34} = m(u_3 - u_4)$$

$$W_{net} = m(u_1 - u_2 + u_3 - u_4) + p_{23}(V_3 - V_2)$$

$$Q_{23} = m(u_3 - u_2)$$

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{23}}$$



(Zaprta sistem za en krog)

Ottov vs Dieslov Krožni Proces	OTTO	DIESEL
Višja stopnja kompresije	-	✓ (14-22)
Nižja stopnja kompresije	✓ (6-10)	-
Dovojana toplota pri konstantnem tlaku	-	✓
Dovojana toplota pri konstantnem volumnu	✓	-
Iskra	✓	-

7.3 Ottov krožni proces se začne s procesom kompresije zraka pri tlaku 90 kPa. Volumen plina, prisotnega v valju na začetku kompresije, je 0,001 m³. Med procesom segrevanja zraku dovedemo 1200 kJ/kg toplote. Kompresijsko razmerje krožnega procesa je 8,5. Izračunajte delo, proizvedeno v enem krožnem procesu, maksimalne temperature krožnega procesa, termični izkoristek krožnega procesa za temperaturo na začetku kompresije 100 °C. Predpostavite, da se zrak obnaša kot idealni plin s konstantnima specifičnima toplotama.

$$T_1 = 373,15 \text{ K} \quad P_1 = 90 \text{ kPa} \quad Q_{23}/m = 1200 \text{ kJ/kg} \quad v_1 = 0,001 \text{ m}^3 \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} = 8,5$$

$$W_{net} = ? \quad \eta = ?$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = 373,15 \text{ K} (8,5)^{1,4-1} = 878,3 \text{ K} \quad m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{90000 \text{ Pa} \times 0,001 \text{ m}^3}{287 \text{ J/kgK} \times 373,15 \text{ K}} = 8,4 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$Q_{23} = mc_v (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 = \frac{Q_{23}}{mc_v} + T_2 = \frac{1200 \text{ kJ/kg}}{0,718 \text{ kJ/kgK}} + 878,3 \text{ K} = 2549,6 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = 2549,6 \text{ K} \left(\frac{1}{8,5}\right)^{1,4-1} = 1083,2 \text{ K}$$

$$W_{net} = m(u_1 - u_2 + u_3 - u_4) = mc_v (T_1 - T_2 + T_3 - T_4) = 8,4 \times 10^{-4} \text{ kg} \times 0,718 \text{ kJ/kgK} (373,15 - 878,3 + 2549,6 - 1083,2) = 0,58 \text{ kJ}$$

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{23}} = \frac{0,58 \text{ J}}{1200 \text{ kJ/kg} \times 8,4 \times 10^{-4}} = 0,575$$

7.4 Diesellov krožni proces ima delovno tekočino zrak. Začetni proces je proces kompresije pri 100 kPa in 40 °C. Med procesom segrevanja zraku dovedemo 1200 kJ/kg toplote. Kompresijsko razmerje krožnega procesa je 18. Obravnavajte zrak kot idealni plin z konstantnimi specifičnimi toplotami in določite (a) temperaturo in tlak na koncu vsakega procesa, (b) v krožnem procesu proizvedeno skupno delo na kg zraka in (c) termični izkoristek krožnega procesa.

$$T_1 = 40 \text{ °C} = 313,15 \text{ K} \quad P_1 = 100 \text{ kPa} \quad \frac{Q_{23}}{m} = 1200 \text{ kJ/kg} \quad \frac{V_1}{V_2} = 18$$

$$T_i = ? \quad p_i = ? \\ w_{net} = ? \quad \eta = ?$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = 313,15 \text{ K} (18)^{1,4-1} = 995,09 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} = 100 \text{ kPa} (18)^{1,4} = 5719,8 \text{ kPa}$$

$$Q_{23} = mc_p (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 = \frac{Q_{23}}{mc_p} + T_2 = \frac{1200 \text{ kJ/kg}}{1,005 \text{ kJ/kgK}} + 995,09 \text{ K} = 2189,1 \text{ K}$$

$$P_3 = P_2 = 5719,8 \text{ kPa}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \text{ J/kgK} \times 313,15 \text{ K}}{100000 \text{ Pa}} = 0,898 \text{ m}^3/\text{kg} = v_4$$

$$v_2 = \frac{v_1}{18} = \frac{0,898 \text{ m}^3}{18} = 0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2} = 0,05 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times \frac{2189,1 \text{ K}}{995,09 \text{ K}} = 0,11 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa-1} = 2189,1 \text{ K} \left(\frac{0,11 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,898 \text{ m}^3/\text{kg}} \right)^{1,4-1} = 949 \text{ K}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa} = 5719,8 \text{ kPa} \left(\frac{0,11 \text{ m}^3/\text{kg}}{0,898 \text{ m}^3/\text{kg}} \right)^{1,4} = 302,5 \text{ kPa}$$

$$\frac{W_{net}}{m} = \frac{W_{12} + W_{23} + W_{34}}{m} = c_v (T_1 - T_2 + T_3 - T_4) + p_{23} (v_3 - v_2) =$$

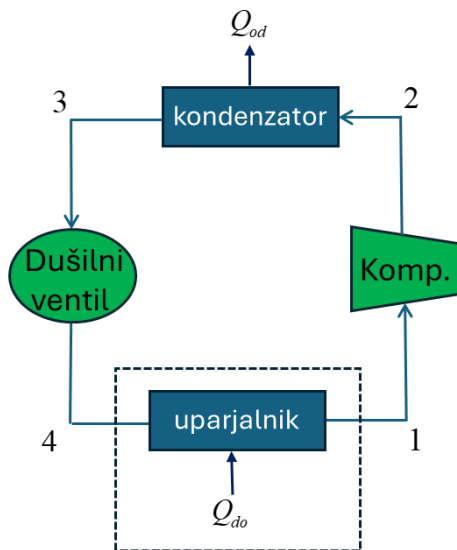
$$= 0,718 \text{ kJ/kgK} (313,15 - 995,05 + 2189,1 - 949) + 5719,8 (0,11 - 0,05) = 744 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{W_{net}/m}{Q_{23}/m} = \frac{744 \text{ kJ/kg}}{1200 \text{ kJ/kg}} = 0,62$$

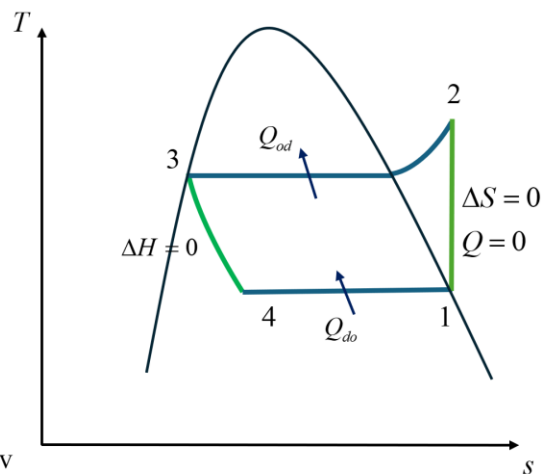
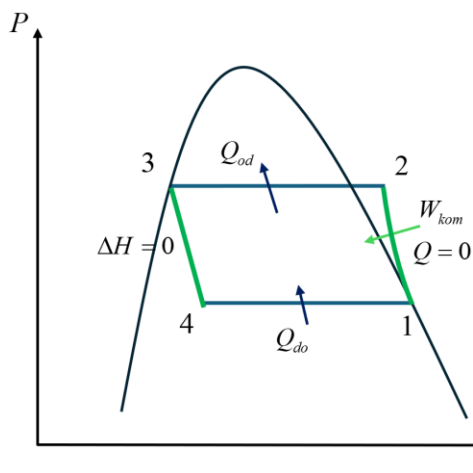
8 Hladilni krožni procesi

Hladilni cikli potekajo v obratni smeri kot cikli za proizvodnjo dela. Glavni cilj tukaj ni ustvarjanje energije, temveč da se energija dovajana sistemu odvaja preko kondenzatorja. Obstajata dve vrsti hladilnih ciklov, ena izkorišča fazno spremembo (parno-kompresijski cikel), druga pa je obrnjen Brayton.

Hladilni krožni proces (parno-kompresijski)



- 1 – 2 izentropna kompresija
- 2 – 3 izobarna odvajena toplota
- 3 – 4 izentalpna ekspanzija
- 4 – 1 izobarna dovajena toplota

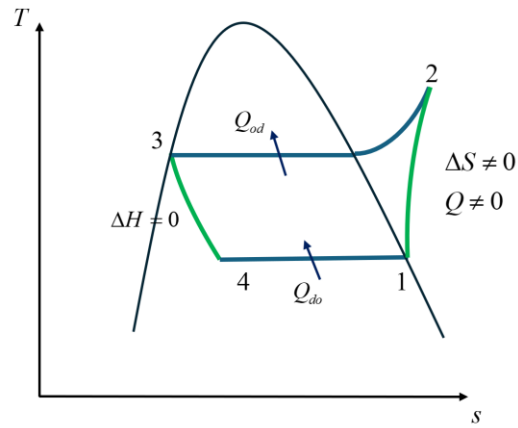
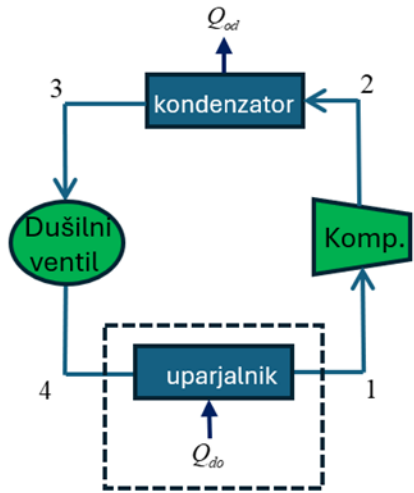


$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

Hladilni krožni proces (neidealni)



- 1-2 ~~izentropna~~ kompresija
- 2-3 izobama odvajena toplota
- 3-4 izentalpna ekspanzija
- 4-1 izobama dovajena toplota

$$\eta_c = \frac{h_1 - h_2^*}{h_1 - h_2}$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

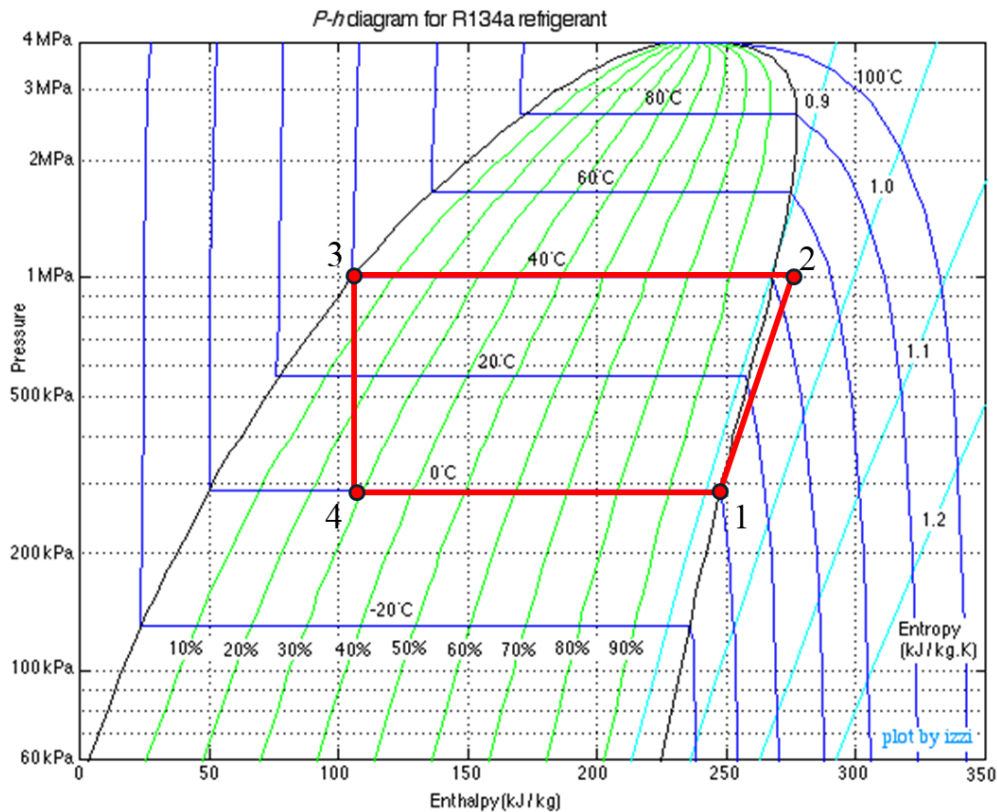
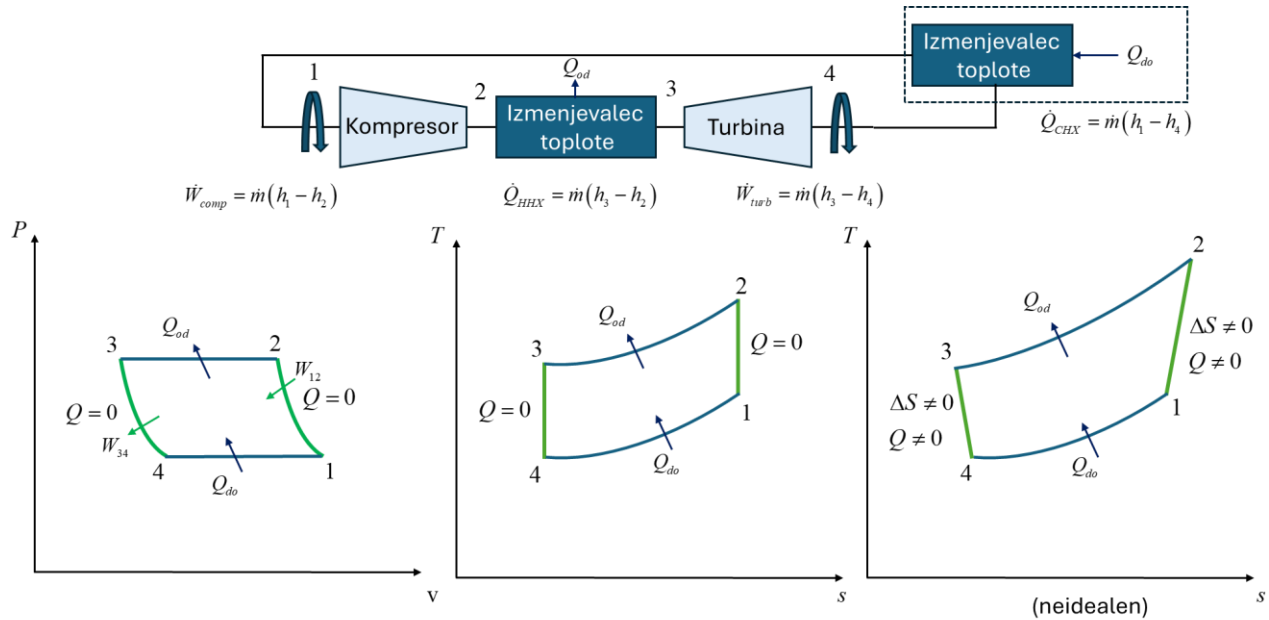


Diagram tlaka in entalpije za hladilno sredstvo R134a [4].

Obrnjen Braytonov krožni proces (neidealni)



Naloge

8.1 Za hlajenje hrane pri temperaturi 2 °C se uporablja hladilnik, postavljen v prostoru s temperaturo 21 °C. (a) Zasnujte osnovni krožni proces delovne tekočine hladilnika, ki bo omogočal, da sta ti temperaturi doseženi. (b) Kolikšno je Carnotsko hladilno število v tem primeru?

$$T_H = 2 \text{ °C} \quad T_T = 21 \text{ °C}$$

$$\eta'_{\max} = ?$$

Če uporabimo plin R-134a za hladilnik [5],

Temp [°C]	Pressure	Volume [m³/kg]		Density [kg/m³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/(kg)(K)]		Temp [°C]
	kPa (abs)	Liquid v_f	Vapor v_g	Liquid $1/v_f$	Vapor $1/v_g$	Liquid h_f	Latent h_{fg}	Vapor h_g	Liquid s_f	Vapor s_g	
0	292.93	0.0008	0.0693	1293.3	14.435	200.0	198.8	398.8	1.0000	1.7278	0
1	303.70	0.0008	0.0669	1290.0	14.946	201.3	198.0	399.4	1.0049	1.7273	1
2	314.77	0.0008	0.0646	1286.7	15.472	202.7	197.3	400.0	1.0098	1.7267	2
22	608.49	0.0008	0.0338	1217.0	29.549	230.4	180.7	411.0	1.1060	1.7182	22
23	627.25	0.0008	0.0328	1213.3	30.462	231.8	179.8	411.6	1.1107	1.7178	23
24	646.44	0.0008	0.0318	1209.6	31.399	233.2	178.9	412.1	1.1155	1.7175	24

$$p_{\text{upar}} = 292,93 \text{ kPa} \quad (T = 0 \text{ °C})$$

$$p_{\text{kond}} = 627,25 \text{ kPa} \quad (T = 23 \text{ °C})$$

$$\eta'_{\max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{275,15}{19} = 14,48$$

8.2 Toplotna črpalka je zasnovana tako, da prenaša toploto v stavbo pri temperaturi 25 °C in prejema toploto pod zemljo pri temperaturi 8 °C. Kolikšno je najvišje dosegljivo grelno število?

$$T_H = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\eta''_{\max} = ?$$

$$\eta''_{\max} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{298,15 \text{ K}}{17 \text{ K}} = 17,54$$

8.3 Parno-kompresijski hladilni krožni proces uporablja hladivo R-134a. Masni pretok R-134a je 0,15 kg/s. R-134a zapuša uparjalnik kot suha para pri absolutnem tlaku 138,5 kPa in vstopa v dušilni ventil kot vrela kapljevina pri absolutnem tlaku 706 kPa. Določite hladnemu prostoru skozi uparjalnik odvedeni toplotni tok in hladilno število krožnega procesa hladilnika če je, (a) kompresor izentropen in če je (b) izentropni izkoristek kompresorja 0,78. (c) Določite najvišje dosegljivo hladilno število.

$$\dot{m} = 0,15 \text{ kg/s}$$

$$P_{14} = 138,5 \text{ kPa}$$

$$P_{23} = 706 \text{ kPa}$$

$$\eta_c = 0,78$$

$$\dot{Q}_{upar} = ?$$

$$\eta' = ?$$

$$\eta'_{\max} = ?$$

a)

$$h_1 = 387,4 \text{ kJ/kg} \quad s_1 = 1,7413 \text{ kJ/kg K} \quad \Rightarrow \quad s_2 = 1,7413 \text{ kJ/kg K} \quad \Rightarrow \quad h_2 = 420 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 237,5 \text{ kJ/kg} = h_4 \quad \dot{Q}_{upar} = \dot{m}(h_1 - h_4) = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (387 - 237,5) \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = 22,48 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (387,4 - 420) \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = -4,89 \text{ kW} \quad \eta' = \frac{\dot{Q}_e}{|\dot{W}_{comp}|} = \frac{22,48}{4,89} = 4,6$$

b)

$$\eta_c = 0,78 \quad 0,78 = \frac{h_1 - h_2^*}{h_1 - h_2} \quad \Rightarrow \quad h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_2^*}{0,78} = 387,4 - \frac{387,4 - 420}{0,78} = 429,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 237,5 \text{ kJ/kg} = h_4$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (387,4 - 429,19) \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} = -6,27 \text{ kW}$$

$$\eta' = \frac{\dot{Q}_e}{|\dot{W}_{comp}|} = \frac{22,48}{6,27} = 3,59$$

c)

$$T_C = T_1 = -19 \text{ }^{\circ}\text{C} = 254,15 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \quad \eta'_{\max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{254,15 \text{ K}}{46 \text{ K}} = 5,52$$

$$T_C = T_1 = 27 \text{ }^{\circ}\text{C} = 300,15 \text{ K}$$

8.4 Obrnjeni Braytonov krožni proces deluje v zaprti zanki in ima delovno tekočino plinasti dušik. N_2 vstopa v kompresor pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 120 kPa . N_2 vstopa v turbino pri $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in izstopnem tlaku kompresorja. Masni pretok N_2 je $1,5\text{ kg/s}$. Izentropni izkoristek kompresorja in turbine sta vsak $0,80$. Izračunajte odvedeni toplotni tok iz hladnega prostora skozi hladni prenosnik toplote in hladilno število krožnega procesa za izstopni tlak kompresorja 1000 kPa . Predpostavite, da se dušik obnaša kot idealni plin s konstantnima specifičnima toplotama.

$$\dot{m} = 1,5\text{ kg/s} \quad T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_1 = 120\text{ kPa} \quad T_3 = 40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad P_3 = 1000\text{ kPa} \quad \eta_k = \eta_t = 0,8$$

$$\frac{T_2^*}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_2^* = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 273,15\text{ K} \left(\frac{1000}{120}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 500,6\text{ K} \quad \boxed{\dot{Q}_{CHX} = ? \quad \eta' = ?}$$

$$\frac{T_4^*}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_4^* = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 313,15\text{ K} \left(\frac{120}{1000}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 170,87\text{ K}$$

$$\eta_k = \frac{T_1 - T_2^*}{T_1 - T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 - \frac{T_1 - T_2^*}{\eta_k} = 273,15 - \frac{273,15 - 500,6}{0,8} = 557,46\text{ K}$$

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4^*} \Rightarrow T_4 = T_3 - \eta_t (T_3 - T_4^*) = 313,15 - 0,8(313,15 - 170,87) = 199,33\text{ K}$$

$$\dot{Q}_{CHX} = \dot{m}(h_4 - h_1) = \dot{m}c_p(T_1 - T_4) = 1,5\frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,038\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (273,15 - 199,33)\text{K} = 111,77\text{ kW}$$

$$\dot{W}_{neto} = \dot{W}_{comp} + \dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2 + h_3 - h_4) = \dot{m}c_p(T_1 - T_2 + T_3 - T_4)$$

$$\dot{W}_{neto} = 1,5\frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,038\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (273,15 - 557,46 + 313,15 - 199,33)\text{K} = -265,7\text{ kW}$$

$$\eta' = \frac{\dot{Q}_{CHX}}{|\dot{W}_{neto}|} = \frac{111,77}{265,45} = 0,42$$

8.5 Suho paro amonijaka pri tlaku 11,67 bar ohlajamo na kondenzatorju do stanja vrele kapljevine in potem dušimo na tlak 0,718 bar. Kakšen je masni tok NH_3 , če je toplotna moč kondenzatorja 21 kW? Kolikšna je suhost pare po dušenju? Podatki za amonijak so podani v SP.

$$p_1 = 11,67 \text{ bar} \quad p_3 = 0,718 \text{ bar} \quad \dot{Q} = 21 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = ? \quad \bar{x}_3 = ?$$

$$\dot{m} = 0,0183 \text{ kg/s}$$

$$\bar{x}_3 = 0,233$$

9 Mešanica idealnih plinov

Za idealno plinsko mešanico lahko definiramo parcialni tlak, masni delež, molski delež, parcialni volumen, idealno plinsko konstanto in specifične toplote. Ustrezne relacije so predstavljene spodaj.

Masni delež

$$m = \sum_{i=1}^N m_i \quad \Rightarrow \quad X_{mi} = \frac{m_i}{m}$$

Molski delež

$$M = \left(\sum_{i=1}^N \frac{X_{mi}}{M_i} \right)^{-1} \quad \Rightarrow \quad X_{Ni} = X_{mi} \frac{M}{M_i}$$

Parcialni volumen in tlak

$$X_{Ni} = \frac{V_i}{V} \quad X_{Ni} = \frac{P_i}{P}$$



Plinska konstanta mešanice

$$R = \frac{R_0}{M} \quad \rightarrow \quad 8,314 \text{ kJ/kmolK}$$

Specifična toplota mešanice

$$c_P = \sum_{i=1}^N X_{mi} c_P^i \quad c_V = \sum_{i=1}^N X_{mi} c_V^i$$

Naloge

9.1 Mešanica plinov sestoji iz 2 kg H₂, 7 kg CO₂ in 5 kg N₂. Določite masni in molski delež vsake sestavine, molekulsko maso mešanice in plinsko konstanto mešanice.

$$m = \sum_{i=1}^3 m_i = (2 + 7 + 5) = 14 \text{ kg}$$

$$X_{m_i} = \frac{m_i}{m} \Rightarrow X_{mH_2} = \frac{2}{14} = 0,143 \quad X_{mCO_2} = \frac{7}{14} = 0,5 \quad X_{mN_2} = \frac{5}{14} = 0,357$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{X_{m_i}}{M_i} \right)^{-1} = \left(\frac{0,143}{2,016} + \frac{0,5}{44,01} + \frac{0,357}{28,02} \right)^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 10,693 \text{ kg/kmol} \quad (\text{S.P. str. 179})$$

$$X_{Ni} = X_{mi} \frac{M}{M_i} \Rightarrow X_{NH_2} = X_{mH_2} \frac{M}{M_{H_2}} = 0,758 \quad X_{NCO_2} = X_{mCO_2} \frac{M}{M_{CO_2}} = 0,121 \quad X_{NN_2} = X_{mN_2} \frac{M}{M_{N_2}} = 0,136$$

$X_{mi} = ? \quad X_{Ni} = ?$
 $M = ? \quad R = ?$

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8,314 \text{ kJ/kmolK}}{10,69 \text{ kg/kmol}} = 0,777 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

9.3 Rezultat gravimetrijske (masno osnovane) analize zmesi plinov je, da ima zmes 25 % N₂, 60 % CO₂ in 15 % neznanega plina. Plinska konstanta opazovane zmesi je 0,227 kJ/kgK. Določite molekulsko maso neznanega plina in smiselno določite, kateri je neznani plin.

$$M = \frac{R_0}{R} = \frac{8,314 \text{ kJ/kmolK}}{0,227 \text{ kg/kmol}} = 36,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{X_{mi}}{M_i} \right)^{-1} = \left(\frac{0,25}{28,02} + \frac{0,6}{44,01} + \frac{0,15}{M_X} \right)^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 36,63 \text{ kg/kmol} \Rightarrow M_X = 31,62 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \Rightarrow X \approx \text{Kisik}$$

(S.P. str. 179)

$X_{mN_2} = 0,25 \quad X_{mCO_2} = 0,6 \quad X_{mX} = 0,15 \quad R = 0,227 \text{ kJ/kgK}$
 $M = ?$
 neznani plin = ?

9.3 Zmes idealnih plinov sestoji iz 70% N₂, 25% H₂ in 5% CO₂ podano v masnih deležih. Skupni volumen, ki za zapolnjuje zmes, je 1,25 m³. Določite parcialni volumen vsake sestavine zmesi.

$$\boxed{X_{mN_2} = 0,7 \quad X_{mH_2} = 0,25 \quad X_{mCO_2} = 0,05 \quad V = 1,25 \text{ m}^3} \quad \boxed{V_i = ?}$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{X_{mi}}{M_i} \right)^{-1} = \left(\frac{0,7}{28,02} + \frac{0,25}{2,016} + \frac{0,05}{44,01} \right)^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 6,66 \text{ kg/kmol} \quad (\text{S.P. str. 179})$$

$$X_{Ni} = X_{mi} \frac{M}{M_i} \rightarrow X_{NN_2} = X_{mN_2} \frac{M}{M_{N_2}} = 0,165 \quad X_{NH_2} = X_{mH_2} \frac{M}{M_{H_2}} = 0,826 \quad X_{NCO_2} = X_{mCO_2} \frac{M}{M_{CO_2}} = 0,0075$$

$$V_i = X_{Ni} V \rightarrow \begin{cases} V_{N_2} = X_{NN_2} V = 0,165 \times 1,25 \text{ m}^3 = 0,206 \text{ m}^3 \\ V_{H_2} = X_{NH_2} V = 0,826 \times 1,25 \text{ m}^3 = 1,03 \text{ m}^3 \\ V_{CO_2} = X_{NCO_2} V = 0,0075 \times 1,25 \text{ m}^3 = 0,0094 \text{ m}^3 \end{cases}$$

9.4 Zmes idealnih plinov sestoji iz 1,5 kg N₂, 2,5 kg O₂ in 0,15 kg CO₂. Določite molekulsko maso zmesi ter izobarno in izohorno specifično toploto zmesi pri 300 K.

$$m = \sum_{i=1}^3 m_i = (1,5 + 2,5 + 0,15) = 4,15 \text{ kg} \quad \boxed{m_{N_2} = 1,5 \text{ kg} \quad m_{O_2} = 2,5 \text{ kg} \quad m_{N_2} = 0,15 \text{ kg}} \quad \boxed{M = ? \quad c_p = ? \quad c_v = ?}$$

$$X_{mi} = \frac{m_i}{m} \rightarrow X_{mN_2} = \frac{1,5}{4,15} = 0,361 \quad X_{mO_2} = \frac{2,5}{4,15} = 0,602 \quad X_{mN_2} = \frac{0,15}{4,15} = 0,0361$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{X_{mi}}{M_i} \right)^{-1} = \left(\frac{0,316}{28,02} + \frac{0,602}{32} + \frac{0,0361}{44,01} \right)^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 32,35 \text{ kg/kmol} \quad (\text{S.P. str. 179})$$

(S.P. str. 179)

Plin	c_p (kJ/kgK)	c_v (kJ/kgK)
N ₂	1,038	0,741 ($\kappa = 1,4$)
O ₂	0,913	0,652 ($\kappa = 1,4$)
CO ₂	0,820	0,631 ($\kappa = 1,3$)

$$c_p = \sum_{i=1}^3 X_{mi} c_p^i = 0,361 \times 1,038 + 0,602 \times 0,913 + 0,0361 \times 0,82 = 0,954 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_v = \sum_{i=1}^3 X_{mi} c_v^i = 0,361 \times 0,741 + 0,602 \times 0,652 + 0,0361 \times 0,631 = 0,683 \text{ kJ/kgK}$$

9.10 Zmes idealnih plinov ima sestavo 50% N₂, 40% O₂ in 10% CH₄ v masnih deležih. Absolutni tlak zmesi je enak 450 kPa. Določi parcialne tlake posameznih komponent plinske zmesi.

$$X_{mN_2} = 0,5 \quad X_{mO_2} = 0,4 \quad X_{mCH_4} = 0,1 \quad p = 450 \text{ kPa}$$

$$X_{Ni} = ?$$

$$X_{NN_2} = 219,6 \text{ kPa}$$

$$X_{NO_2} = 153,9 \text{ kPa}$$

$$X_{NCH_4} = 76,5 \text{ kPa}$$

9.11 Zemeljski plin predstavlja plinsko zmes sestavljeno iz 90 % mase metana (CH₄) ter 10 % mase etana (C₂H₆). Določi molske deleže posameznih komponent ter plinsko konstanto zemeljskega plina.

$$m_{CH_4} = 0,9m \quad m_{C_2H_6} = 0,1m$$

$$X_{mi} = ? \quad R = ?$$

$$X_{mCH_4} = 0,944$$

$$X_{mC_2H_6} = 0,05595$$

$$R = 494,5 \text{ J/kg K}$$

10 Vlažni zrak

Vlažen zrak je sestavljen iz suhega zraka in vodne pare. Njuno razmerje določa vlažnost zraka. Z odprtim sistemom, kot je vlažilec zraka ali razvlažilnik zraka, lahko spremenimo vlažnost zraka. V tem poglavju bomo računali relativno vlažnost zraka, parcialni tlak vodne pare, masni pretok, itd.

Relativna vlažnost

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}}$$

Molski delež

$$M = \sum_{i=1}^N X_{Ni} M_i$$

Razmerje vlažnosti

$$X_{vg} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

Entalpija

$$h_z = h_g + X_{vg} h_v$$

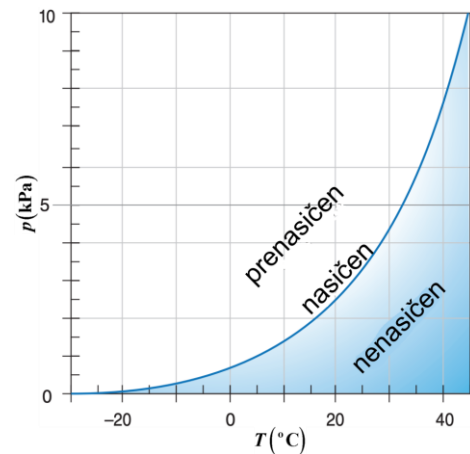
$$X_{vg} = \frac{\dot{m}_{par}}{\dot{m}_{sz}}$$

Masni pretok

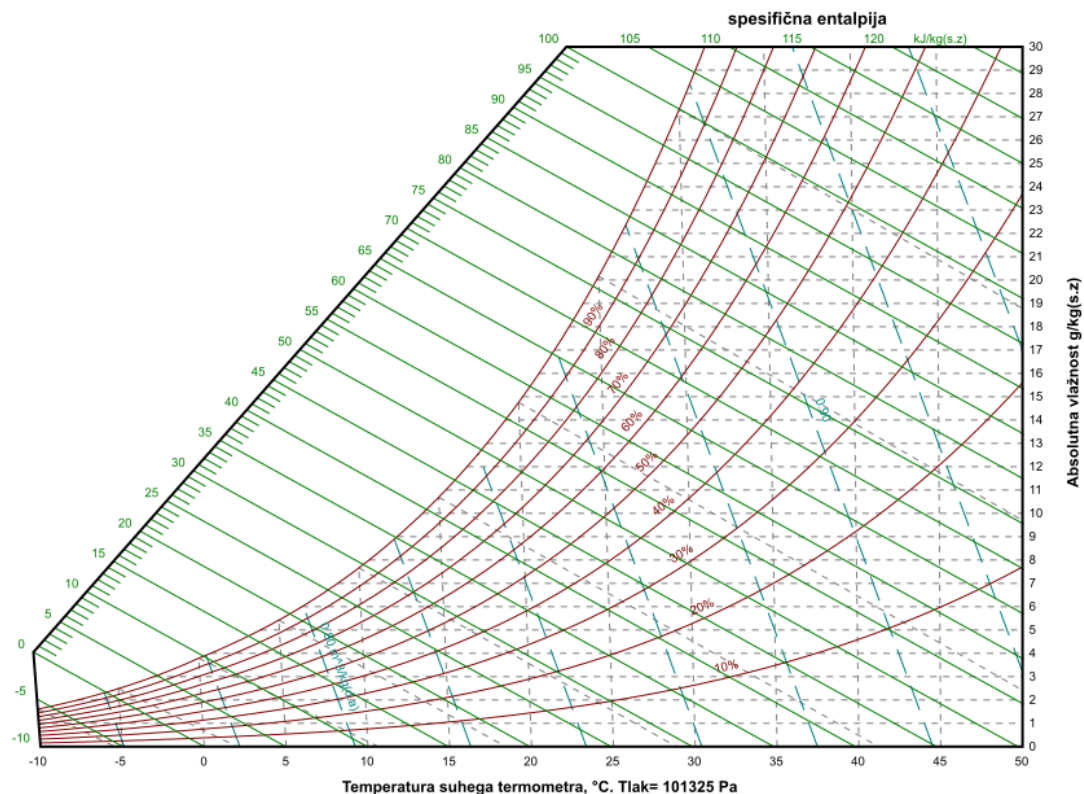
$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_v$$

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \omega \dot{m}_g$$

$$\dot{m} = \frac{PV}{RT}$$



Nasičen tlak - Temperatura



Psihrometrični graf za vlažni zrak.

Naloge

10.1 Vlažen zrak vstopa v cev z volumskim pretokom $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Zrak ima temperaturo 25°C , relativno vlažnost 30% in tlak $101,325 \text{ kPa}$. Za zmes določite masni pretok suhega zraka, volumen na enoto mase suhega zraka in entalpijo na enoto mase suhega zraka ($M_{\text{par}} = 18 \text{ kg/kmol}$).

$$\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad T = 25^\circ\text{C} \quad \phi = 0,3 \quad P = 101,325 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= ? \\ v_g &= ? \\ h &= ? \end{aligned}$$

$$P_{\text{sat}}(25^\circ\text{C}) = \frac{P_{\text{sat}}(24^\circ\text{C}) + P_{\text{sat}}(26^\circ\text{C})}{2} = \frac{(2,982 + 3,36) \text{ kPa}}{2} = 3,17 \text{ kPa} \quad (\text{S.P. str. 212})$$

$$P_v = \phi P_{\text{sat}} = 0,3 \times 3,17 \text{ kPa} = 0,951 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{vg}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} = 0,622 \frac{0,951}{3,17 - 0,951} = 0,00589 \text{ kg H}_2\text{O/kg suh zrak}$$

$$X_{\text{Ni}} = \frac{p_i}{p} \Rightarrow X_{\text{Nv}} = \frac{p_v}{p} = \frac{0,951}{101,325} = 0,00939 \quad X_{\text{Ng}} = 1 - 0,00939 = 0,9906$$

$$M = X_{\text{Nv}} M_v + X_{\text{Ng}} M_g = 0,00939 \times 18 + 0,9906 \times 28,96 = 28,86 \text{ kg/kmole} \quad (\text{S.P. str. 179})$$

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8,314 \text{ kJ/kmolK}}{28,86 \text{ kg/kmol}} = 0,288 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} = \frac{101,325 \text{ kPa} \times 0,5 \text{ m}^3/\text{s}}{0,288 \text{ kJ/kgK} \times 298,15 \text{ K}} = 0,59 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_v = \dot{m}_g + X_{\text{vg}} \dot{m}_g = 0,59 \text{ kg/s} \Rightarrow \dot{m}_g = \frac{0,59}{1,00589} = 0,587 \text{ kg/s}$$

$$v_g = \frac{\dot{V}}{\dot{m}_g} = \frac{0,5 \text{ m}^3/\text{s}}{0,587 \text{ kg/s}} = 0,86 \text{ m}^3/\text{kg (suh zrak)}$$

$$h_g(25^\circ\text{C}) = \frac{273,3 (0^\circ\text{C}) + 323,6 (50^\circ\text{C})}{2} = 298,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{S.P. str. 185})$$

$$h_v(P_v \approx 0,01 \text{ bar}) = 2539 + 0,25(2576 - 2539) = 2548 \text{ kJ/kg} \quad (\text{S.P. str. 191, } T = 20\text{--}40^\circ\text{C})$$

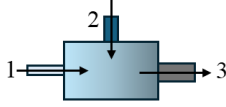
$$h = h_g + X_{\text{vg}} h_v = (298,45 + 0,00589 \times 2548) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h = 313,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

10.2 Adiabatni nasičevalnik prejema zrak pri 20 °C. Nasičen zrak zapišča napravo pri 15 °C. Temperatura vode je prav tako 15 °C. Določite vlažnost in relativno vlažnost vstopajočega zraka, če je zračni tlak 101,325 kPa.

$$T_1 = 20 \text{ °C} \quad T_2 = T_3 = 15 \text{ °C} \quad P = 101,325 \text{ kPa}$$

$$X_{vg1} = ? \quad \phi^1 = ?$$



$$\frac{\dot{m}_g h_g^1 + \dot{m}_v^1 h_v^1 + \dot{m}_v h_v^2}{\dot{m}_g} = \frac{\dot{m}_g h_g^3 + \dot{m}_v^3 h_v^3}{\dot{m}_g}$$

$$\dot{m}_g h_g^1 + \dot{m}_v^1 h_v^1 + \dot{m}_v h_v^2 = \dot{m}_g h_g^3 + \dot{m}_v^3 h_v^3$$

$$h_g^1 + X_{vg1} h_v^1 + (X_{vg3} - X_{vg1}) h_v^2 = h_g^3 + X_{vg3} h_v^3$$

$$X_{vg1} h_v^1 - X_{vg1} h_v^2 = X_{vg3} h_v^3 - X_{vg3} h_v^2 + h_g^3 - h_g^1$$

$$X_{vg1} = \frac{X_{vg3} h_v^3 - X_{vg3} h_v^2 + h_g^3 - h_g^1}{h_v^1 - h_v^2} = \frac{X_{vg3} (h_v^3 - h_v^2) + c_p (T_3 - T_1)}{h_v^1 - h_v^2}$$

$$h_v^1 = 2538 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_v^3 \approx 2538 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ (\text{S.P. str. 212-191})$$

$$X_{vg1} = \frac{0,011(2538 - 63) \text{ kJ/kg} + 1,005 \text{ kJ/kgK} (15 - 20)}{(2538 - 63) \text{ kJ/kgK}} = 0,00897 \text{ kg H}_2\text{O/kg suh zrak}$$

$$h_v^2 = 84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times \frac{15}{20} = 63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad X_{vg3} = 0,011 \\ (\text{S.P. str. 193}) \quad (\text{od diagrama})$$

$$X_{vg1} = 0,622 \frac{p_v^1}{p - p_v^1} = 0,00897 \Rightarrow p_v^1 = 1,44 \text{ kPa}$$

$$p_{sat}(20 \text{ °C}) = 2,337 \text{ kPa} \\ (\text{S.P. str. 212})$$

$$\phi^1 = \frac{p_v^1}{p_{sat}} = \frac{1,44}{2,337} = 62 \%$$

10.3 Vroč vlažen zrak pri 30 °C z relativno vlažnostjo 60 % vstopa v hladilno in razvlaževalno napravo z masnim pretokom suhega zraka 2,5 kg/s. Po prečkanju hladilnih navitij se nasičen zrak segreje na 22 °C in relativno vlažnost 30 %. Zračni tlak je 101,325 kPa. Določite toplotni tok skozi hladilna navitja in grelni element ter določite pretok kondenzata, ki zapušča sistem.

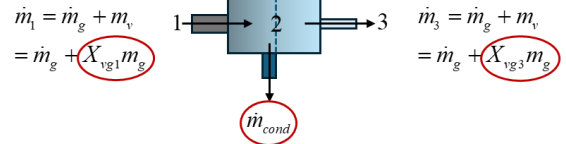
$$T_1 = 30 \text{ °C} \quad \phi_1 = 0,6 \quad T_3 = 22 \text{ °C} \quad \phi_3 = 0,3 \quad \dot{m} = 2,5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_C = ? \quad \dot{Q}_H = ?$$

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= 72 \text{ kJ/kg suh zrak} & X_{vg1} &= 0,016 \text{ kg H}_2\text{O/kg suh zrak} \\ h_3 &= 35 \text{ kJ/kg suh zrak} & X_{vg3} &= 0,005 \text{ kg H}_2\text{O/kg suh zrak} \\ X_{vg2} &= X_{vg3} \Rightarrow T_2 = 4 \text{ °C} (T_{dp}) \Rightarrow h_2 = 16,5 \text{ kJ/kg suh zrak} \end{aligned} \right\} \text{Od diagrama}$$

$$\dot{m}_{cond} = (X_{vg1} - X_{vg3}) \dot{m}_g = 2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (0,016 - 0,005) = 0,0278 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_g (h_2 - h_1) + \dot{m}_{cond} h_{cond} = 2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (16,5 - 72) \frac{\text{kJ}}{\text{kg SZ}} + 0,0278 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{s}} 0,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -138,75 \text{ kW} \\ (T_2 \approx 0 \text{ °C})$$



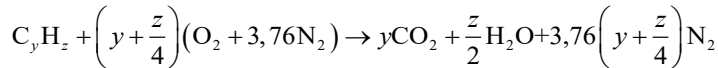
$$X_{vg1} \dot{m}_g = \dot{m}_{cond} + X_{vg3} \dot{m}_g$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_g (h_3 - h_2) = 2,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (35 - 16,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg SZ}} = -46,25 \text{ kW}$$

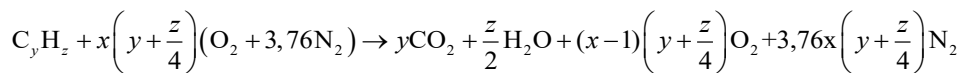
11 Analiza zgorevanja

Zgorevanje je nepovračljiva kemična reakcija med gorivom in oksidantom, ki sprošča toploto. Odstotek teoretičnega zraka nam pomaga ugotoviti, ali je zgorevanje idealno ali popolno. Zato je razmerje med zrakom in gorivom ključni parameter te kemijske reakcije.

Idealno zgorevanje



Popolno zgorevanje



Odprt sistem

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eng} = \dot{H}_P - \dot{H}_R \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{\dot{n}_{goriva}} = \sum_P \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{goriva}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R}) - \sum_R \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{goriva}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R})$$

Zaprt sistem

$$Q - W = U_P - U_R \Rightarrow \frac{Q}{n_{goriva}} = \sum_P \frac{N_i}{N_{goriva}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R}) - \sum_R \frac{N_i}{N_{goriva}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R})$$

Ob konstantem tlaku in v
ustaljanem stanju

Razmerje goriva in zraka

$$AF = \frac{m_{zrak}}{m_{goriva}}$$

Razmerje goriva in
zraka na podlagi
molov

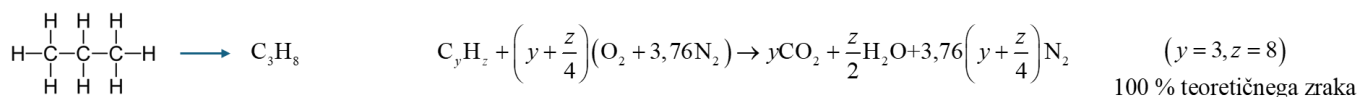
$$\underline{AF} = \frac{N_{zrak}}{N_{goriva}}$$

Ekvivalenčno razmerje

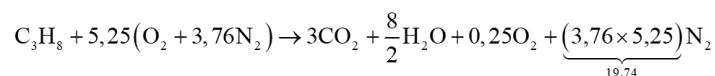
$$\Phi = \frac{AF_a}{AF_{st}}$$

Naloge

11.1 Mešanica propana in zraka z molskim razmerjem zrak-gorivo 25 zgori. Napišite (a) urejeno kemijsko enačbo tega procesa in določite (b) odstotek teoretičnega zraka, (c) odstotek presežka ali primanjkljaja zraka, (d) masno razmerje zrak-gorivo in (e) ekvivalenčno razmerje procesa.



$$\text{AF} = \frac{N_{\text{zrak}}}{N_{\text{goriva}}} = \frac{x(1+3,76)}{1} = 25 \Rightarrow x = 5,25 \quad \Rightarrow \quad \frac{5,25}{5} = 105\% \text{ teoretičnega zraka} \quad \Rightarrow \quad 5\% \text{ presežka zraka}$$



$$\text{AF} = \frac{m_{\text{zrak}}}{m_{\text{goriva}}} = \frac{5,25(32) + 19,74(28)}{1(44)} = 16,35$$

teoretičnega zraka

$$\Phi = \frac{\text{AF}_a}{\text{AF}_{st}} = \frac{\frac{5(1+3,76)}{1}}{25} = \frac{23,8}{25} = 0,952$$

(stehiometrični)

11.2 Gorivo sestoji iz 90 % oktana in 10 % etanola izraženo v masnih deležih. Gorivo se doda zraku, da je masno razmerje zrak-gorivo 15,5. Napišite urejeno kemijsko enačbo popolnega zgorevanja te mešanice. Določite odstotek teoretičnega zraka in ekvivalenčno razmerje procesa.

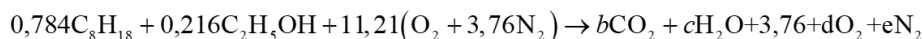
$$X_{\text{mC}_8\text{H}_{18}} = 0,9 \qquad X_{\text{mC}_2\text{H}_5\text{OH}} = 0,1$$

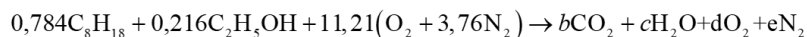
$$\begin{array}{l} \% \text{ teoreticni zrak} = ? \\ \Phi = ? \end{array}$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{X_{mi}}{M_i} \right)^{-1} = \left(\frac{0,9}{114 \text{ kg/kmol}} + \frac{0,1}{46 \text{ kg/kmol}} \right)^{-1} = 99,3 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$X_{Ni} = X_{mi} \frac{M}{M_i} \Rightarrow X_{\text{NC}_8\text{H}_{18}} = X_{\text{mC}_8\text{H}_{18}} \frac{M}{M_{\text{C}_8\text{H}_{18}}} = 0,9 \frac{99,3}{114} = 0,784 \qquad X_{\text{NC}_2\text{H}_5\text{OH}} = X_{\text{mC}_2\text{H}_5\text{OH}} \frac{M}{M_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}} = 0,1 \frac{99,3}{46} = 0,216$$

$$\text{AF} = \frac{m_{\text{zrak}}}{m_{\text{goriva}}} = \frac{x(32) + 3,76x(28)}{1(99,3)} = 15,5 \Rightarrow x = 11,21$$



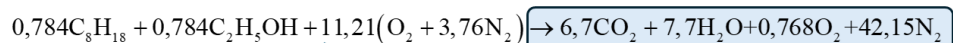


$$\text{C} \Rightarrow 0,784 \times 8 + 0,216 \times 2 = b = 6,7$$

$$\text{H} \Rightarrow 0,784 \times 18 + 0,216 \times 6 = 2c \Rightarrow c = 7,7$$

$$\text{O} \Rightarrow 0,216 \times 11,2 \times 2 = 2b + c + 2d \Rightarrow d = 0,768$$

$$\text{N} \Rightarrow 11,2 \times 3,76 \times 2 = 2e \Rightarrow e = 42,15$$



$$\text{C} \Rightarrow 0,784 \times 8 + 0,216 \times 2 = b = 6,7$$

$$\text{H} \Rightarrow 0,784 \times 18 + 0,216 \times 6 = 2c \Rightarrow c = 7,7$$

$$\text{O} \Rightarrow 0,216 \times 2a = 2b + c \Rightarrow a = 10,44$$

$$\text{N} \Rightarrow 11,2 \times 3,76 \times 2 = 2e \Rightarrow e = 42,15$$

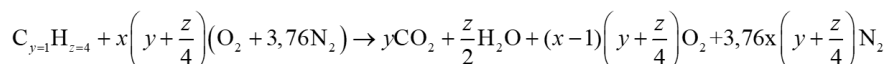
$$\Phi = \frac{10,44}{11,21} = 0,931 \text{ ekvivalenčno razmerje}$$

$$\frac{11,21}{10,44} = 107\% \text{ teoretični zrak}$$

11.3 Metan vstopa skupaj z zrakom v zgorevalno komoro pri ekvivalenčnem razmerju 0,85 in popolno zgoreva v ustaljenem procesu. Reaktanti vstopajo pri 298 K in izstopajo pri 665 K. Določite toploto kemične reakcije (na mol metana), ki je se sprostila pri tem procesu.

$$\Phi = 0,85 \quad T_R = 298 \text{ K} \quad T_P = 665 \text{ K}$$

$$\dot{Q} / \dot{N}_{\text{goriva}}$$



$$\Phi = 0,85 = \frac{\left(y + \frac{z}{4}\right)}{x\left(y + \frac{z}{4}\right)} \Rightarrow x\left(y + \frac{z}{4}\right) = 2,35 \quad \Rightarrow \quad \text{CH}_4 + 2,35(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,35\text{O}_2 + 8,84\text{N}_2$$

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{N}_{\text{goriva}}} = \sum_P \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{\text{goriva}}} (\dot{h}_{f,i}^0 + \dot{h}_{i,T_P} - \dot{h}_{i,T_R}) - \sum_R \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{\text{goriva}}} (\dot{h}_{f,i}^0 + \dot{h}_{i,T_P} - \dot{h}_{i,T_R})$$

vrsta	$\underline{h}_f^0$ (kJ/mol)	$\underline{h}_{666\text{K}}$ (kJ/mol)	$\underline{h}_{298\text{K}}$ (kJ/mol)
CO ₂	-393,52	24,45	9,364
O ₂	0	20,07	8,682
N ₂	0	19,56	8,669
CH ₄	-74,85	-	-
H ₂ O	-241,82	22,82	9,904

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{Q}}{\dot{N}_{\text{goriva}}} &= \sum_P \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{\text{goriva}}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R}) - \sum_R \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{\text{goriva}}} (\underline{h}_{f,o}^0 + \underline{h}_{i,T_P} - \underline{h}_{i,T_R}) \\
&= 1(-393,52 + 24,45 - 9,364) + 2(-241,82 + 22,82 - 9,904) + 2,35(20,07 - 8,682) + 8,84(19,56 - 8,669) \\
&\quad - 1(-74,85) - 2,35(20,07 - 8,682) - 8,84(19,56 - 8,669) \\
&= -810,8 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

12 Reference

- [1] B. Šarler, T. Dobravec, Termodinamika = Thermodynamics. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2025.
- [2] K. Mitjan, N. Herakovič, C. Arkar, V. Butala, Krautov Strojniški Priročnik. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2024.
- [3] J. R. Reisel, Principles of Engineering Thermodynamics, Second Edition, Cengage, Boston, 2022.
- [4] M. N. Sinha, Intelligent Demand Side Management of Residential Building Energy Systems, Dizertacija, University of North Carolina, Charlotte, 2013.
- [5] Freon™ 134a Refrigerant Thermodynamic Properties (SI Units), The Chemours Company FC, LLC, 2018.