

DK 621.57.01

Ocenjevanje hladilnih procesov

MIRAN OPREŠNIK

Pri vrednotenju hladilnih procesov moramo mimo energij poznati tudi eksergije in anergije. Kako z diagramom e, i določamo eksergije, smo že prikazali [1]. S tem diagramom pa lahko odbiramo tudi anergije. S slike 1 je jasno razviden postopek pri določitvi eksergije e_1 in anergije b_1 . S črtico so označene vrednosti, ki se nanašajo na spremenjene pogoje okolice. Nova premica okolice a' je vrisana črtkano. Dokaz izhaja preprosto iz dokaza za eksergijo pri spremenjenih pogojih okolice [1] in iz dejstva, da je vsota eksergije in anergije enaka energiji

$$\frac{W}{m} = e + b = i - i_o - T_o (s - s_o) + \\ + T_o (s - s_o) = i - i_o \quad (1)$$

Ta ugotovitev velja za eksergijo in anergijo notranje energije.

Podobno ravnamo tudi pri določanju eksergije in anergije topote. Odbiranje eksergije in anergije v diagramu e, i je za izobarno topoto prikazano na sliki 2, pri spremenjenih pogojih okolice pa na sliki 3. Ker je eksergija izobarne topote enaka razliki eksergij v končnem in začetnem stanju [1]

$$e_Q = e_2 - e_1 \quad (2)$$

velja enako tudi pri spremenjenih pogojih okolice, ker je

$$e_2' = i_2 - i_o' - T_o' (s_2 - s_o') \\ \text{in } e_1' = i_1 - i_o' - T_o' (s_1 - s_o').$$

Razlika obeh eksergij res predstavlja eksergijo topote

$$e_Q' = e_2' - e_1' = i_2 - i_1 - T_o' (s_2 - s_1) \quad (3)$$

Za anergijo pa velja

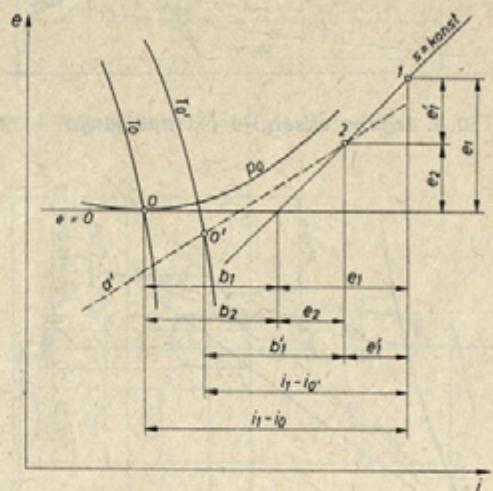
$$b_Q = \int_1^2 \frac{T_o}{T} \frac{dQ}{m} = T_o \int_1^2 \frac{ds}{s} = T_o (s_2 - s_1) \quad (4)$$

in analogno ob spremenjenih pogojih okolice

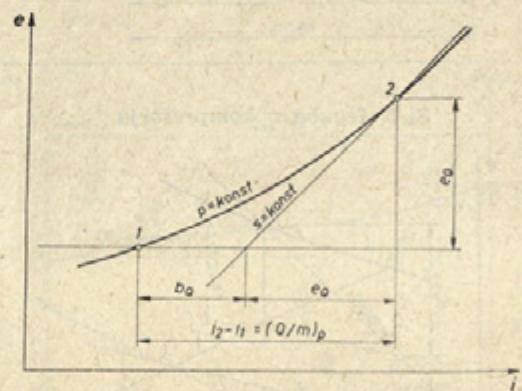
$$b_Q' = T_o' (s_2 - s_1) \quad (5)$$

Za vsoto eksergije in anergije pa velja tudi v tem primeru enačba (1).

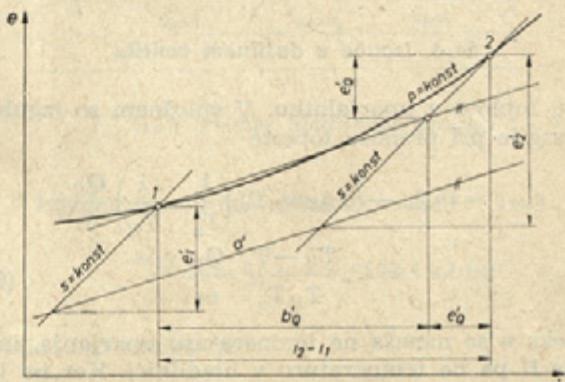
Preprosto pa v diagramu e, i odbiramo tudi izgube, ki nastajajo zaradi nepovračljivosti v procesu. Najprej si ogledimo izgube eksergije pri pre-



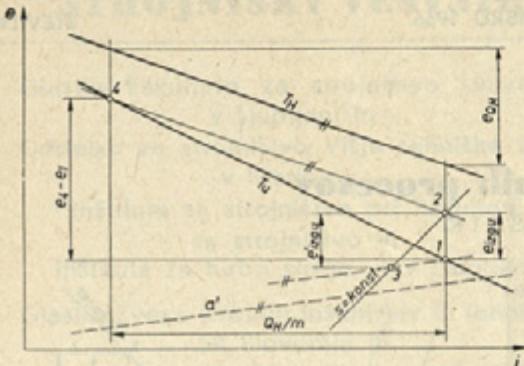
Sl. 1. Določanje eksergij in anergij



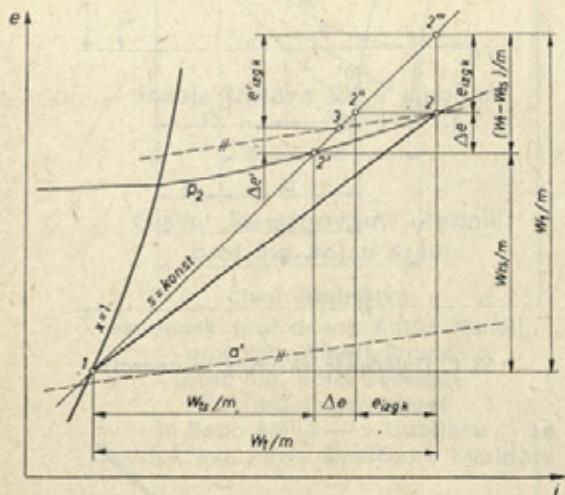
Sl. 2. Eksergija in anergija izobarne topote



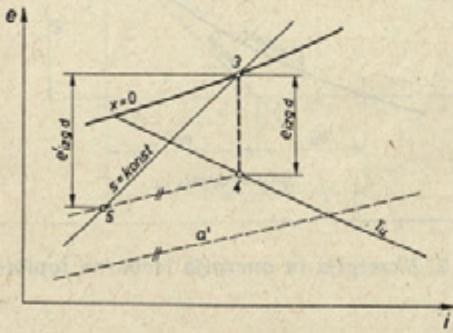
Sl. 3. Eksergija in anergija izobarne topote pri spremenjenih pogojih okolice



Sl. 4. Izgube eksergije pri uparjanju



Sl. 5. Izgube v kompresorju



Sl. 6. Izgube v dušilnem ventilu

nosu toplote v uparjalniku. V splošnem so izgube eksergije pri prenosu toplote

$$\begin{aligned} e_{izg,u} &= (b_Q)_u - (b_Q)_H = T_o \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_H} \right) \frac{Q_H}{m} = \\ &= T_o \frac{T_H - T_u}{T_H T_u} \cdot \frac{Q_H}{m} \end{aligned} \quad (6)$$

Indeks u se nanaša na temperaturo uparjanja, indeks H pa na temperaturo v hladilnici. Ker pa je hladilna toplota Q_H hkrati izobarna, velja tudi

$$e_{izg,u} = (e_1 - e_2) - |e_{Q_H}| \quad (7)$$

Zmanjšanje eksergije hladilnega sredstva pri uparjanju ($e_1 - e_2$) je večje od eksergije hladilne toplote e_{Q_H} . Razlika obeh so seveda izgube v uparjalniku. S slike 4 je razvidno, kako določamo te izgube grafično. Iz stanja 4 na začetku uparjanja potegnemo paralelo s temperaturo v hladilnici T_H in na ordinati skozi končno stanje pri uparjanju 1 že lahko odberemo izgube. Eksergija hladilne toplote Q_H je

$$|e_{Q_H}| = e_1 - e_2, \quad (8)$$

iz enačbe (7) pa izhaja

$$e'_{izg,u} = (e_1 - e_2) - (e_1 - e_2) = e_2 - e_1 \quad (9)$$

Podobno dobimo izgube tudi pri spremenjenih pogojih okolice, saj tudi v tem primeru velja, da je

$$e'_{izg,u} = (e'_1 - e'_2) - (e'_1 - e'_2) = e'_2 - e'_1 \quad (10)$$

O rezultatu se lahko takoj prepričamo z enostavno konstrukcijo. Na sliki 4 je črtkano vrisana nova premica okolice a' . Iz stanja 1 potegnemo k tej paralelo in vertikalna razdalja med stanjem 2 in presečiščem izentropne skozi 2 s paralelo (stanje 3) je že iskana izguba $e'_{izg,u}$.

Analogno ravnamo pri izgubah v kondenzatorju. Ker pa v tem primeru ne odvzemamo koristne eksergije, določamo izgube preprosto po slikah 2 oziroma 3.

Tudi izgube eksergije v kompresorju lahko pri spremenjenih pogojih okolice določamo preprosto. Skozi končno stanje po kompresiji 2 potegnemo paralelo k novi premici okolice a' , kar je razvidno s slike 5. Določitev izgub pri spremenjenih pogojih okolice $e'_{izg,k}$ in povečanja eksergije hladilnega sredstva $\Delta e'$ je zelo preprosta.

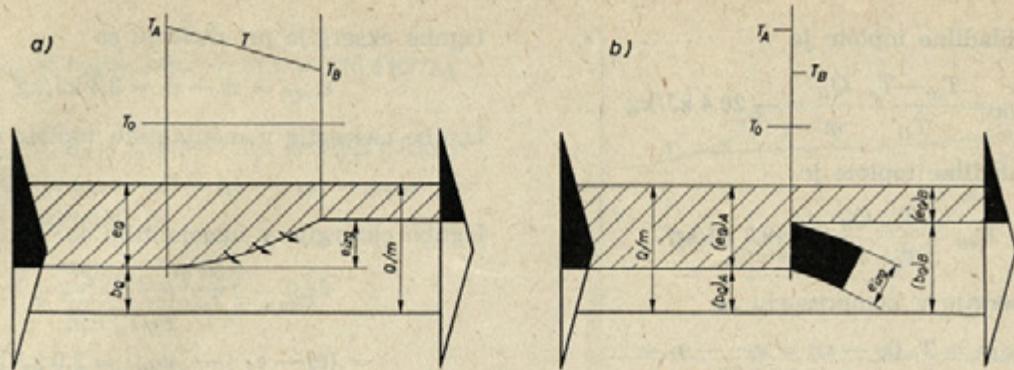
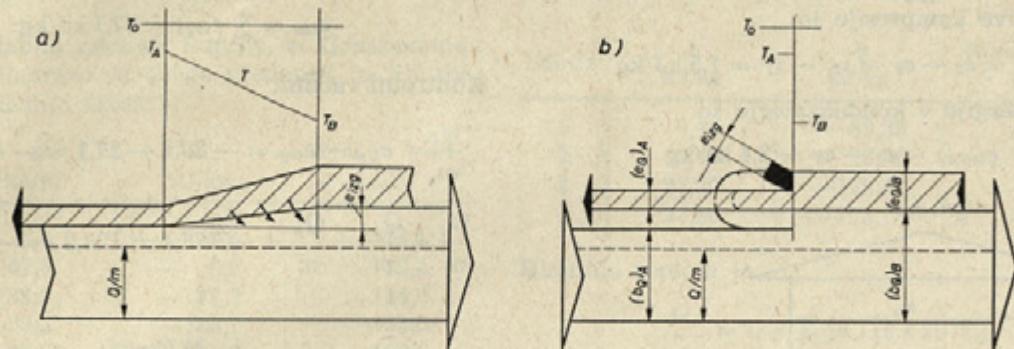
Tudi izgube eksergije v dušilnem ventilu odberemo preprosto (slika 6). Skozi stanje 4 potegnemo paralelo k novi premici okolice a' in skozi stanje 3 izentropo. Določitev izgub $e'_{izg,d}$ je razvidna slike.

Na sliki 7 sta prikazana načina za risanje toka eksergije in anergije pri prenosu toplote pri temperaturah, večjih od temperature okolice $T > T_o$. Na sliki 8 pa je narisan tok eksergije in anergije pri temperaturah $T < T_o$. Pod a) je v obeh primerih narisan način, kakršnega je prikazal Baehr [2], pod b) pa način, kakršnega je uporabljaj Rant [3]. V obeh primerih velja, da je

$$b_Q + e_Q = \frac{Q}{m} \quad (11)$$

V primeru, da je temperatura $T < T_o$, je seveda eksergija toplote negativna, torej usmerjena nasprotno od anergije.

Oglejmo si še kvalitativno analizo v konkretnem primeru. Proses je narisan na sliki 9. Drugi podatki so naslednji:

Sl. 7. Tok eksnergije in anergije pri temperaturah $T > T_0$ Sl. 8. Tok eksnergije in anergije pri temperaturah $T < T_0$

temperatura okolice $T_0 = 293,15 \text{ K}$; $\vartheta_0 = +20^\circ\text{C}$
temperatura hladil-

nice $T_H = 253,15 \text{ K}$; $\vartheta_H = -20^\circ\text{C}$

temperatura upar-

janja $T_u = 248,15 \text{ K}$; $\vartheta_u = -25^\circ\text{C}$

temperatura konden-

zacije $T = 303,15 \text{ K}$; $\vartheta = +30^\circ\text{C}$

temperatura podhla-

jenja $T_3 = 298,15 \text{ K}$; $\vartheta_3 = +25^\circ\text{C}$

temperatura pare ob

vstopu v kompresor $T_1 = 268,15 \text{ K}$; $\vartheta_1 = -5^\circ\text{C}$

notranji (izentropni) izkoristek kompresorja $\eta_{sk} = 0,75$.

Porabljeno delo je

$$\frac{W_t}{m} = i_1 - i_2 = \frac{i_1 - i_{2'}}{\eta_{sk}} = \frac{-35,6}{0,75} = -47,5 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija po kompresiji je

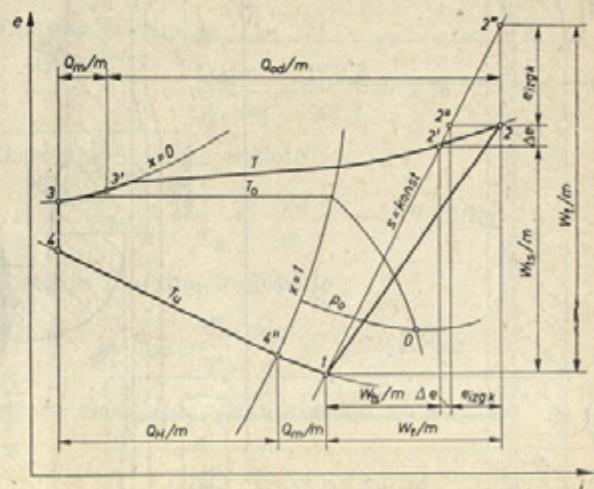
$$i_2' = i_1 - \frac{W_t}{m} = 288,5 + 47,5 = 336,0 \text{ kJ/kg}$$

V menjalniku izmenjana toplota je

$$\frac{Q_m}{m} = i_1 - i_{4''} = i_3 - i_3 = 11,5 \text{ kJ/kg}$$

Hladilna toplota je

$$\frac{Q_H}{m} = i_{4''} - i_4 = 128,9 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 9. Primer hladilnega procesa

V kondenzatorju odvedena toplota je

$$\frac{Q_{od}}{m} = i_{3'} - i_2 = -176,4 \text{ kJ/kg}$$

Hladilno število je

$$\varepsilon = \frac{Q_H/m}{|W_t|/m} = \frac{128,9}{47,5} = 2,71$$

Eksergija hladilne toplote je

$$e_{Q_H} = \frac{T_H - T_o}{T_H} \cdot \frac{Q_H}{m} = -20,4 \text{ kJ/kg}$$

Anergijska hladilna toplota je

$$b_{Q_H} = \frac{T_o}{T_H} \cdot \frac{Q_H}{m} = 149,3 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v kompresorju so

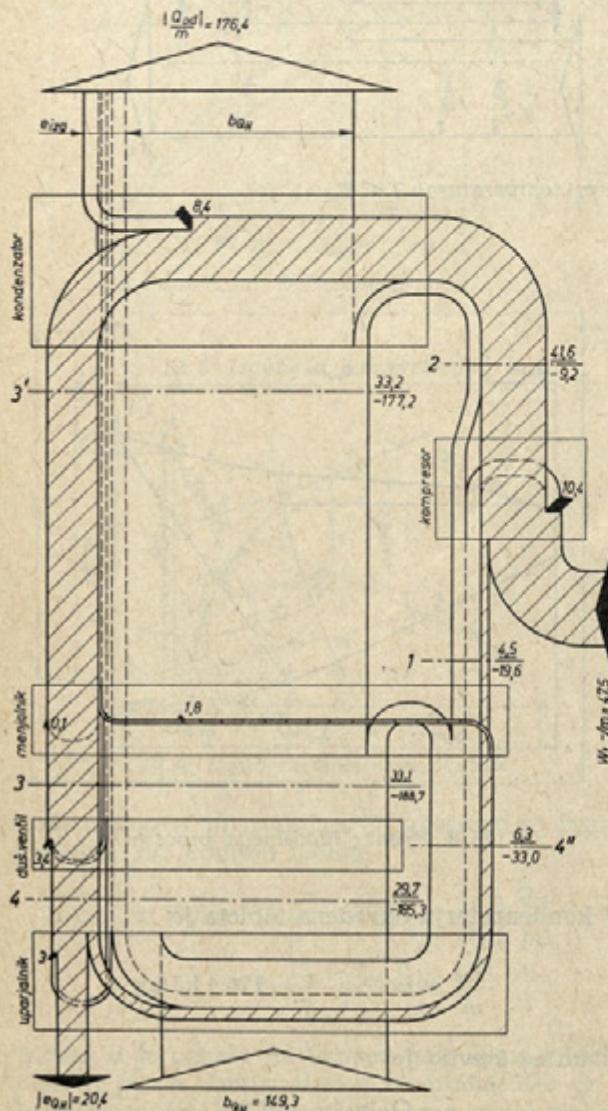
$$\begin{aligned} e_{izg\ k} &= T_o (s_2 - s_1) = e_2'' - e_2 = \\ &= i_2 - i_2'' = 10,4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Povečanje eksergije hladilnega sredstva zaradi nepovračljive kompresije je

$$\Delta e = e_2 - e_2' = i_2'' - i_2' = 1,5 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v kondenzatorju so

$$e_{izg\ kd} = e_2 - e_3' = 8,4 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 10. Rantov diagram hladilnega procesa

Izgube eksergije pri dušenju so

$$e_{izg\ d} = e_3 - e_4 = 3,4 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v menjalniku toplote so

$$e_{izg\ m} = (e_{T''} - e_1) - (e_3 - e_3') = 1,9 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v uporjalniku so

$$\begin{aligned} e_{izg\ u} &= T_o \frac{T_H - T_u}{T_H T_u} \frac{Q_H}{m} = \\ &= (e_4 - e_{T'}) - |e_{Q_H}| = 3,0 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

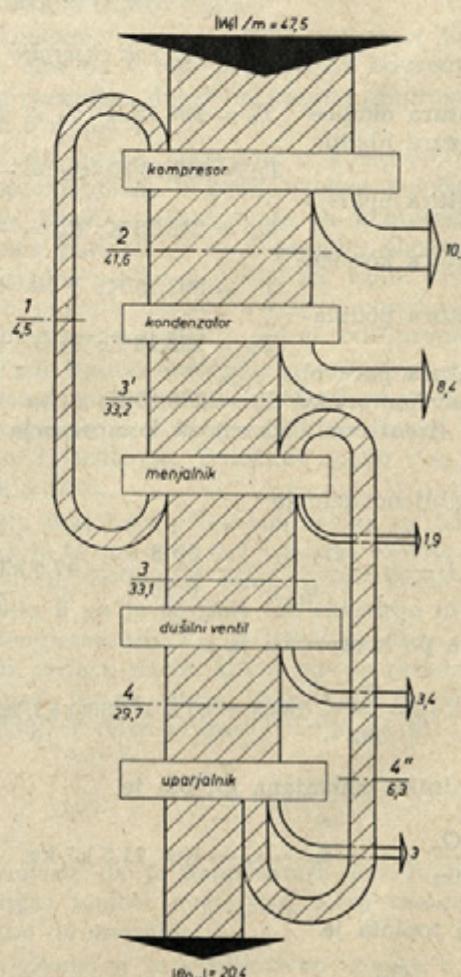
Vsota vseh izgub je

$$e_{izg} = \sum_i e_{izg\ i} = 27,1 \text{ kJ/kg}$$

Kontrolni računi:

$$\frac{W_t}{m} = e_{Q_H} - e_{izg} = -20,4 - 27,1 = -47,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{W_t}{m} = \frac{Q_{od}}{m} + \frac{Q_H}{m} = -176,4 + 128,9 = -47,5 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 11. Grassmannov diagram hladilnega procesa

$$\frac{|Q_{od}|}{m} = b_{Q_H} + e_{izg} = 149,3 + 27,1 = 176,4 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_H}{m} = b_{Q_H} + e_{Q_H} = 149,3 - 20,4 = 128,9 \text{ kJ/kg}$$

Eksergetski izkoristek je

$$\zeta = \frac{e_{Q_H}}{W_t/m} = \frac{-20,4}{-47,5} = 0,43$$

ali pa

$$\zeta = \frac{T_o - T_H}{T_H} \quad \varepsilon = \frac{293,15 - 253,15}{253,15} = 2,71 = 0,43$$

Da bi lahko narisali Rantov in Grassmannov diagram, odberemo še druge vrednosti in jih zberemo v naslednjo tabelo:

Stanje	e kJ/kg	b kJ/kg	W/m = i - i _o kJ/kg
1	4,5	-19,6	-15,1
2	41,6	-9,2	+32,4
3'	33,2	-177,2	-144,0
3	33,1	-188,7	-155,6
4	29,7	-185,3	-155,6
4''	6,3	-33,0	-26,7

S temi in prej določenimi vrednostmi narišemo Rantov diagram (slika 10) in Grassmannov diagram (slika 11). Vse vrednosti so odbrane iz diagrama e, i [4].

Oglejmo si še na preprostem primeru, kako vplivajo spremenjeni pogoji okolice na celoten proces. Kompresor naj sesa suho paro in jo komprimira z notranjim izkoristkom $\eta_{sk} = 0,75$. Temperatura kondenzacije naj bo $\vartheta_3 = 30^\circ\text{C}$. Proses naj bo s podhlajenjem pri temperaturi $\vartheta_3 = +25^\circ\text{C}$, temperatura uparjanja pa je $\vartheta_u = -25^\circ\text{C}$. Temperatura v hladilnici naj bo $\vartheta_H = -20^\circ\text{C}$, temperatura okolice $\vartheta_o = +20^\circ\text{C}$ in tlak okolice 1 bar. Shema procesa je razvidna s slike 12.

Izentropno delo je

$$\frac{W_{ts'}}{m} = i_1 - i_{2'} = -32,1 \text{ kJ/kg}$$

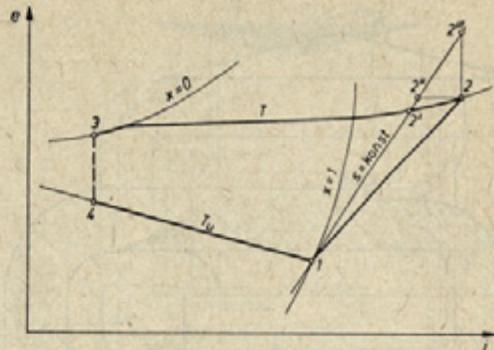
Porabljeno delo je

$$\frac{W_t}{m} = \frac{W_{ts}/m}{\eta_{sk}} = -42,8 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija po kompresiji je

$$i_2 = i_1 - \frac{W_t}{m} = 276,9 + 42,8 = 319,7 \text{ kJ/kg}$$

Sedaj odberimo iz diagrama e, i vse potrebne vrednosti in jih prikažimo v naslednji tabeli:



Sl. 12. Preprost hladilni proces

Stanje	e kJ/kg	b kJ/kg	W/m = i - i _o kJ/kg
1	6,45	-33,35	-26,9
2	39,45	-23,55	+15,9
3	33,20	-178,4	-145,2
4	27,90	-173,1	-145,2

Hladilna topota je

$$\frac{Q_H}{m} = i_1 - i_2 = 118,3 \text{ kJ/kg}$$

Odvedena topota je

$$\frac{Q_{od}}{m} = i_3 - i_2 = -161,1 \text{ kJ/kg}$$

Hladilno število je

$$\varepsilon = \frac{Q_H/m}{|W_t/m|} = \frac{118,3}{42,8} = 2,76$$

Eksergija hladilne topote je

$$e_{QH} = \frac{T_H - T_o}{T_H} \cdot \frac{Q_H}{m} = -18,7 \text{ kJ/kg}$$

Anergijska hladilna topota je

$$b_{QH} = \frac{T_o}{T_H} \cdot \frac{Q_H}{m} = 137,0 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v kompresorju so

$$e_{izg,k} = T_o (s_2 - s_1) = e_{2''} - e_{2'} = i_2 - i_{2'} = 9,8 \text{ kJ/kg}$$

Povečanje eksergije hladilnega sredstva zaradi nepovračljive kompresije je

$$\Delta e = e_2 - e_{2'} = i_{2''} - i_{2'} = 0,9 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v uparjalniku so

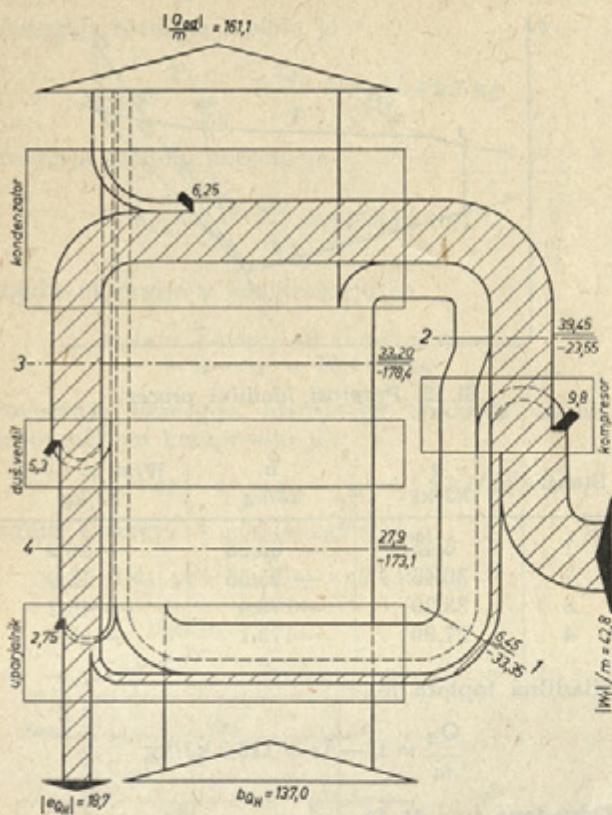
$$e_{izg,u} = (e_4 - e_1) - |e_{QH}| = 2,75 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije v kondenzatorju so

$$e_{izg,kd} = e_2 - e_3 = 6,25 \text{ kJ/kg}$$

Izgube eksergije pri dušenju so

$$e_{izg,d} = e_3 - e_4 = 5,3 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 13. Rantov diagram preprostega hladilnega procesa

Celotne izgube eksergije zaradi nepovračljivosti so

$$e_{izg} = \sum_i e_{izg i} = 24,1 \text{ kJ/kg}$$

Kontrola:

$$\frac{W_t}{m} = e_{Q_H} - e_{izg} = -18,7 - 24,1 = -42,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{W_t}{m} = \frac{Q_{od}}{m} + \frac{Q_H}{m} = -161,1 + 118,3 = -42,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{|Q_{od}|}{m} = b_{Q_H} + e_{izg} = 137,0 + 24,1 = 161,1 \text{ kJ/kg}$$

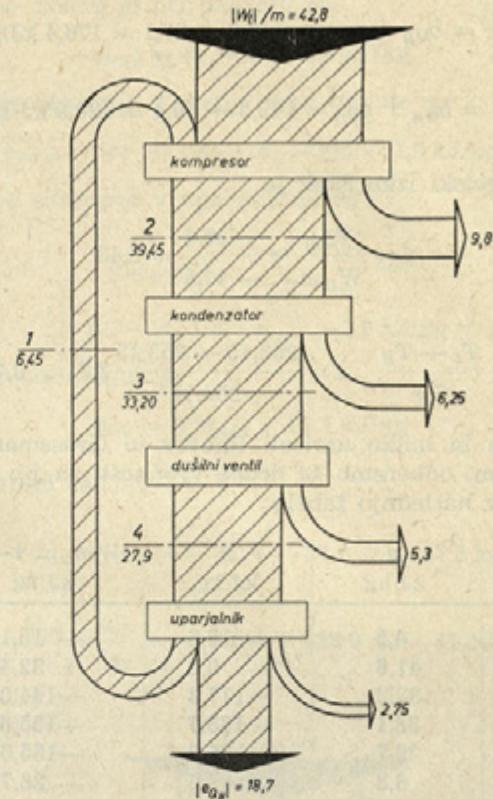
$$\frac{Q_H}{m} = b_{Q_H} + e_{Q_H} = 137,0 - 18,7 = 118,3 \text{ kJ/kg}$$

Eksergetski izkoristek procesa je

$$\zeta = \frac{e_{Q_H}}{W_t/m} = 0,436$$

Rantov diagram za ta primer je narisana na sliki 13, Grassmannov pa na sliki 14.

V naslednjem pa naj ostane proces popolnoma nespremenjen, spremimo samo temperaturo okolice, in sicer naj bo $\theta_o' = 0^\circ\text{C}$. Spremenjene vrednosti posameznih stanj prikažimo v naslednji tabeli:



Sl. 14. Grassmannov diagram preprostega hladilnega procesa

Stanje	e' kJ/kg	b' kJ/kg	W'/m kJ/kg
1	4,55	— 19,35	— 14,8
2	38,45	— 10,45	+ 28,0
3	21,45	— 154,55	— 133,1
4	16,55	— 149,65	— 133,1

Spremenijo se še naslednje vrednosti:
eksergija hladilne toplotne je

$$e'_{Q_H} = -9,4 \text{ kJ/kg}$$

anergija hladilne toplotne je

$$b'_{Q_H} = 127,7 \text{ kJ/kg}$$

izgube eksergije v kompresorju so

$$e'_{izg k} = 8,9 \text{ kJ/kg}$$

izgube eksergije v uparjalniku so

$$e'_{izg u} = 2,6 \text{ kJ/kg}$$

izgube eksergije v dušilnem ventilu so

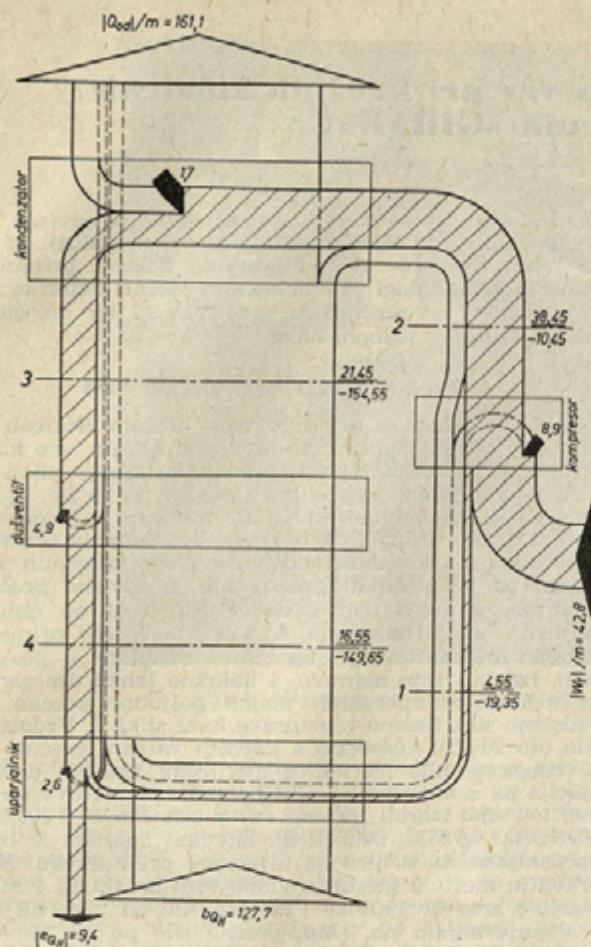
$$e'_{izg d} = 4,9 \text{ kJ/kg}$$

izgube eksergije v kondenzatorju so

$$e'_{izg kd} = 17,0 \text{ kJ/kg}$$

celotne izgube eksergije zaradi nepovračljivosti so

$$e'_{izg} = \sum_i e'_{izg i} = 33,4 \text{ kJ/kg}$$



Sl. 15. Rantov diagram pri spremenjenih pogojih okolice

Kontrola:

$$W_t = e' q_H - e'_{izg} = -9,4 - 33,4 = -42,8 \text{ kJ/kg m}$$

$$Q_H = b' q_H + e' q_H = 127,7 - 9,4 = 118,3 \text{ kJ/kg}$$

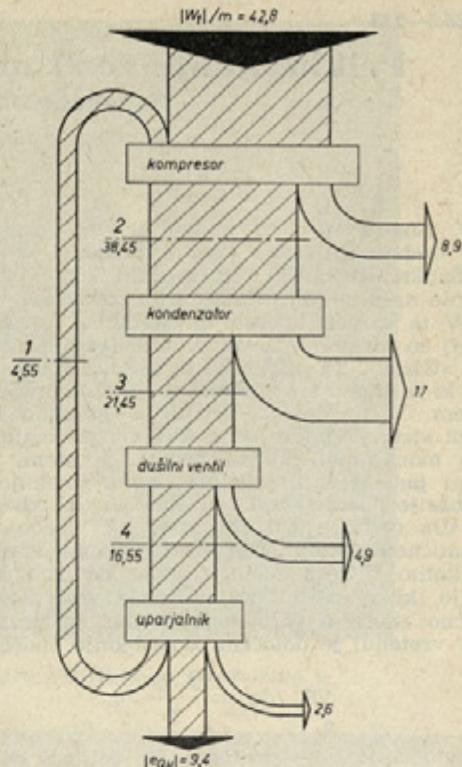
$$\frac{|Q_{od}|}{m} = b' q_H + e'_{izg} = 127,7 + 33,4 = 161,1 \text{ kJ/kg}$$

Eksergetski izkoristek je

$$\zeta = \frac{T_o' - T_H}{T_H} \varepsilon = 0,22$$

Rantov diagram za ta primer je prikazan na sliki 15, Grassmannov pa na sliki 16.

Iz celotnega postopka jasno izhaja, kako preprosta je kvalitativna analiza hladilnega procesa z uporabo diagrama e, i , kar velja tudi za primer spremenjenih pogojev okolice. Pri izračunu zadnjega procesa pa je treba poudariti še nekaj. Pri spremenjenih pogojih okolice bi verjetno lahko znižali temperaturo v kondenzatorju in bi s tem pro-



Sl. 16. Grassmannov diagram pri spremenjenih pogojih okolice

ces seveda postal boljši. Vedno pa to ni izvedljivo, in sicer v primeru, kadar nimamo na voljo hladilne vode z dovolj nizko temperaturo. S tem se seveda izgube v kondenzatorju bistveno povečajo; čeprav so se druge izgube zdaj zmanjšale, je vendarle vsota vseh izgub eksergije v tem primeru večja. To pa pomeni poslabšanje procesa. Ker pa je hladilno število, ki velja kot energetski kriterij za ocenjevanje hladilnih procesov, v obeh primerih enako, lahko takoj spoznamo, da kvantitativna analiza procesa sama ne daje popolnih rezultatov. Edino pravilno oceno procesa dajeta kvalitativna analiza in eksergijski izkoristek, iz katerega pa prav jasno izhaja, da je drugi proces slabši.

Literatura:

- [1] M. Oprešnik: Uporabnost eksergijskega diagrama v hladilni tehniki. Sv, 1966 (3) 57–62.
- [2] H. D. Baehr: Exergie und Anergie und ihre Anwendung in der Kältetechnik. Kältetechnik, 1965 (1) 14–22.
- [3] Z. Rant: Thermodynamische Bewertung der Verluste bei technischen Energieumwandlungen. Bericht 111, Teiltagung der Weltkraftkonferenz, Lausanne 1964.
- [4] M. Oprešnik, L. Kogej: Eksergijski diagram za difluordiklorometan CF_2Cl_2 (R 12). SV, 1966 (4/5) 105–109.

Avtorjev naslov: doc. Miran Oprešnik, dipl. ing., Fakulteta za strojništvo v Ljubljani